



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PEGENDALIAN TEMPERATUR UAP *SUPERHEATER*
MENGUNAKAN KONTROLER PI-*FUZZY AUTO-TUNER*
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)**

Nindya Arthana Farianto
NRP 07111340000072

Dosen Pembimbing
Ir. Ali Fatoni, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**SUPERHEATER STEAM TEMPERATURE CONTROL
USING PI-FUZZY AUTO-TUNER CONTROLLER
IN STEAM POWER PLANT**

Nindya Arthana Farianto
NRP 07111340000072

Supervisor
Ir. Ali Fatoni, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

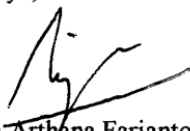
Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul :

**“ Pegendalian Temperatur Uap *Superheater*
Menggunakan Kontroler PI-*Fuzzy Auto-tuner* pada Pembangkit
Listrik Tenaga Uap (PLTU)”**

adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2018



Nindya Arthana Farianto
NRP. 0711134000072

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PEGENDALIAN TEMPERATUR UAP *SUPERHEATER*
MENGUNAKAN KONTROLER PI-FUZZY *AUTO-TUNER*
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)**

TUGAS AKHIR

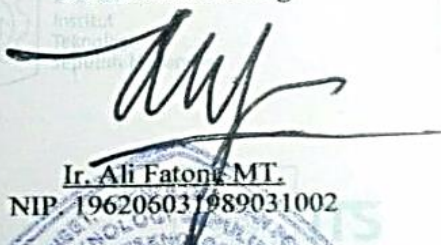
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing



Ir. Ali Fatoni MT.

NIP. 196206031989031002



Halaman ini sengaja dikosongkan

PEGENDALIAN TEMPERATUR UAP *SUPERHEATER* MENGUNAKAN KONTROLER PI-FUZZY AUTO-TUNER PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU)

Nindya Arthana Farianto
07111340000072

Dosen Pembimbing I : Ir. Ali Fatoni, MT.

ABSTRAK

Perubahan permintaan daya listrik yang bervariasi pada PLTU menyebabkan laju uap pada *boiler* juga ikut bervariasi dan tidak menentu. Hal ini merupakan gangguan pada sistem pengaturan temperatur uap *superheater*. Pada pembangkit listrik berkapasitas 500 MW, temperatur uap *superheater* diatur agar tetap bernilai di sekitar 541 °C, maksimum penyimpangan adalah $\pm 10^{\circ}\text{C}$ dari 541°C. Jika terlalu panas atau sebaliknya, maka dapat merusak komponen-komponen dalam *boiler*. Pada umumnya, sistem pengaturan temperatur uap *superheater* menggunakan kontroler PID konvensional. Namun, adanya gangguan yang bervariasi menyebabkan kontroler ini kurang mampu memenuhi spesifikasi. Kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* diterapkan untuk mengatur temperatur uap *superheater* sehingga berada tetap di sekitar *setpoint* yang ditentukan ketika terdapat gangguan. Kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* mampu meredam penyimpangan nilai temperatur uap *superheater* ketika terdapat gangguan berupa beban aliran laju uap untuk 50% - 100% dari beban maksimum, yaitu dengan penyimpangan maksimum (*perturbation peak*) sebesar 9.9 °C.

Kata Kunci : *PI-Fuzzy Auto-tuner*, PID, *Superheater*, PLTU

Halaman ini sengaja dikosongkan

***SUPERHEATER STEAM TEMPERATURE CONTROL
USING PI-FUZZY AUTO-TUNER CONTROLLER
IN STEAM POWER PLANT***

Nindya Arthana Farianto
07111340000072

Supervisor I : Ir. Ali Fatoni, MT.

ABSTRACT

Changes in demand power in steam power plant which variate and have uncertainty. Its make steam flow in boiler variate and have uncertainty too. In 500 MW power plant temperature of superheated steam is maintained at around 541 °C. Maksimum deviation of temperature $\pm 10^{\circ}\text{C}$ of 541 °C. If the temperature is too high or too low, it can damage components of boiler. In general, steam temperatur control using conventional PID controller. However, if there are disturbances, this controller is not able to reach the specification. PI-Fuzzy Auto-tuner controller was applied to adjust the steam temperature in order to be at a point when there is a disturbance. System settings using the PI-Fuzzy Auto-tuner is able to reduce disturbance of 50% - 100% of load with maximum perturbation peak is 9.9 °C.

Keywords: PI-Fuzzy Auto-tuner, PID, Steam Power Plant, Superheater

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian dengan judul “Pegendalian Temperatur Uap *Superhetaer* Menggunakan Kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)” untuk memenuhi syarat kelulusan pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Laporan penelitian ini dapat diselesaikan oleh penulis berkat bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu, Ayah, dan Adik-adik yang selalu memberi dukungan, semangat, doa, dan ridho untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Ir. Ali Fatoni, MT. selaku dosen pembimbing atas bimbingan dan arahannya.
3. Bapak Imam Arifin, ST., MT., Bapak Ir. Joko Susila, MT., dan Bapak Mohamad Abdul Hady, ST., MT selaku pembimbing laboratorium yang telah mendidik penulis menjadi lebih baik.
4. Dosen Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan dan Jurusan Teknik Elektro atas pendidikan dan ilmunya.
5. Teman-teman Lab AJ104: Yusuf, Haris, Willy, Angga, Athfi, yang telah membantu penulis dan selalu memberikan dukungan.
6. Teman-teman Lab B106 & B105: Mas Fery, Mba Iim, Mba Farida, Mba Kiki, Wahyu, Cut, Sunardi, Mas Adeta, Mas Nicco, Mas Wildan dsb yang sangat membantu dalam pengerjaan tugas akhir dan selama masa perkuliahan.
7. Teman-teman seperjuangan: Hendri, Irfan, Rafif, Anang, dan Utha.
8. Larial Tri Julisah atas doa dan dukungannya.
9. Sahabat-sahabat D’pesat: Nanang, Ainul, Aji, Reza, Yudha, Risang, Zaenal, Doni, Yosca, Mutik, Samsul, Erik.
10. Semua teman-teman yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis berharap laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya. Laporan ini masih jauh dari sempurna, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca yang bersifat membangun.

Surabaya,

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
NOMENKLATUR	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 SISTEM PENGATURAN TEMPERATUR UAP	
<i>SUPERHEATER PADA PLTU</i>	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)	5
2.2 <i>Superheater</i> dan <i>Desuperheater</i>	6
2.3 Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Superheater</i>	8
2.3.1 Konfigurasi <i>Cascade</i>	9
2.3.2 Pemodelan <i>Desuperheater</i>	11
2.3.3 Pemodelan <i>Secondary Superheater</i>	14
2.3.4 Pemodelan Sensor Temperatur	18
2.3.5 Pemodelan <i>Control Valve</i>	18
2.4 Linearisasi	19
2.5 Metode Validasi	20
2.6 <i>Anti-Windup</i> [7].....	21
2.6.1 Metode <i>Back-Calculation and Tracking</i>	21
2.6.2 Kontroler dengan Mode <i>Tracking</i>	22
2.7 Kontroler PI [7].....	23
2.7.1 Aksi Proporsional	23

2.7.2	Aksi Integral.....	23
2.8	Aturan <i>Tuning</i> Kontroler PID Ziegler-Nichols [8].....	24
2.8.1	Metode Pertama	24
2.8.2	Metode Kedua	25
2.9	Kontroler Logika <i>Fuzzy</i> [9] [10].....	26
2.9.1	Fuzzifikasi.....	27
2.9.2	Basis Aturan.....	28
2.9.3	Mekanisme Inferensi.....	28
2.9.4	Defuzzifikasi	29
2.10	Kontroler PI- <i>Fuzzy Auto-tuner</i>	30
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM		32
3.1	Pemodelan Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Desuperheater</i>	33
3.2	Pemodelan Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Secondary Superheater</i>	36
3.3	Spesifikasi Respon	38
3.4	Kriteria Pembebanan	38
3.5	Perancangan Kontroler PI.....	40
3.5.1	Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Desuperheater</i> .	40
3.5.2	Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Secondary Superheater</i>	41
3.6	Konfigurasi <i>Anti-Windup</i> dan <i>Tracking</i>	43
3.7	Perancangan Kontroler PI- <i>Fuzzy Auto-tuner</i>	43
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS METODE PI-FUZZY AUTO-TUNER		49
4.1	Pengujian Sistem Secara <i>Open Loop</i>	49
4.4.1.	Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Desuperheater Open Loop</i>	49
4.4.2.	Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Secondary Superheater Open Loop</i>	50
4.2	Pengujian Kontroler PI.....	51
4.2.1	Pengujian Kontroler PI dengan Parameter <i>Plant</i> Tetap	51
4.2.2	Pengujian Kontroler PI dengan Perubahan Parameter <i>Plant</i>	52
4.3	Pengujian Kontroler PI- <i>Fuzzy Auto-tuner</i>	54
4.3.1	Pengujian Kontroler PI- <i>Fuzzy Auto-tuner</i> dengan Parameter <i>Plant</i> Tetap.....	54

4.3.2 Pengujian Kontroler PI-Fuzzy <i>Auto-tuner</i> dengan Perubahan Parameter <i>Plant</i>	55
4.3.3 Perbandingan PI Konvensional dan PI-Fuzzy <i>Auto-tuner</i>	58
BAB 5 KESIMPULAN	59
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	63
Lampiran 1. Linearisasi Model <i>Desuperheater</i>	63
Lampiran 2. Linearisasi Model <i>Secondary Superheater</i>	66
Lampiran 3. Program Simulink Model <i>Desuperheater</i>	70
Lampiran 4. Program Simulink Model <i>Secondary Superheater</i> ...	71
Lampiran 5. Program Simulink Model Temperatur Metal	71
Lampiran 6. Program Simulink Sistem Pengaturan Konfigurasi <i>Cascade</i> dengan Kontroler PI-Fuzzy <i>Auto-tuner</i>	72
Lampiran 7. Program LabVIEW Sistem Pengaturan Konfigurasi <i>Cascade</i> dengan Kontroler PI-Fuzzy <i>Auto-tuner</i>	73
Lampiran 8. Konfigurasi Sistem Pengaturan Menggunakan Kontroler dengan Mode <i>Anti-Windup</i> Dan <i>Tracking</i>	74
Lampiran 9. <i>Human Machine Interface</i> (HMI) Virtual Plant <i>Superheater</i>	75
RIWAYAT PENULIS.....	77

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses Perubahan Energi pada PLTU	5
Gambar 2.2 Ilustrasi <i>Superheater</i> Secara Umum	6
Gambar 2.3 Letak <i>Superheater</i> di Dalam Ruang Pembakaran.....	7
Gambar 2.4 Ilustrasi <i>Desuperheater</i>	8
Gambar 2.5 Diagram Blok konfigurasi <i>cascade</i> Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Superheater</i>	9
Gambar 2.6 P&ID Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Superheater</i>	10
Gambar 2.7 Skema Pemodelan Hukum Keseimbangan Massa pada <i>Desuperheater</i>	11
Gambar 2.8 Skema Pemodelan Hukum Keseimbangan Energi pada <i>Desuperheater</i>	12
Gambar 2.9 Skema Pemodelan Hukum Keseimbangan Massa pada <i>Secondary Superheater</i>	15
Gambar 2.10 Skema Pemodelan Hukum Keseimbangan Energi pada <i>Secondary Superheater</i>	16
Gambar 2.11 Ilustrasi Integral <i>Windup</i>	21
Gambar 2.12 Konfigurasi PID <i>Back-Calculation and Tracking</i>	22
Gambar 2.13 Konfigurasi PID dengan Mode <i>Tracking</i>	22
Gambar 2.14 Respon Sistem dengan Bentuk Huruf-S	25
Gambar 2.15 Respon Osilasi Permanen dengan Periode <i>Pcr</i>	26
Gambar 2.16 Struktur Kontroler Logika <i>Fuzzy</i>	27
Gambar 2.17 Diagram Blok Sistem Pengaturan dengan <i>PI-Fuzzy Auto-tuner</i>	31
Gambar 3.1 Diagram Blok Alur Pemodelan Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Desuperheater</i>	33
Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Desuperheater</i>	33
Gambar 3.3 Diagram Blok Alur Pemodelan Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Secondary Superheater</i>	36
Gambar 3.4 Diagram Blok Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Secondary Superheater</i>	38
Gambar 3.5 Respon Temperatur Uap <i>Secondary Superheater</i>	39
Gambar 3.6 Respon <i>Open Loop</i> Temperatur <i>Desuperheater</i>	41
Gambar 3.7 Diagram Blok Sistem Pengaturan Temperatur Uap <i>Superheater</i> dengan <i>PI-Fuzzy Auto-tuner</i>	44
Gambar 3.8 Fungsi keanggotaan Aliran Uap	45
Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan Perubahan Aliran Uap	45

Gambar 3.10 Fungsi Keanggotaan Parameter K_p	46
Gambar 3.11 Fungsi Keanggotaan Parameter τ_i	46
Gambar 4.1 Respon <i>Open Loop</i> Temperatur Uap <i>Desuperheater</i>	49
Gambar 4.2 Respon Temperatur Uap <i>Secondary Superheater</i>	50
Gambar 4.3 Diagram Blok Sistem Pengaturan dengan Kontroler PI konvensional	51
Gambar 4.4 Pengujian Kontroler PI dengan Parameter <i>Plant</i> Tetap	51
Gambar 4.5 Perubahan Aliran Uap Sebagai Gangguan Sistem.....	52
Gambar 4.6 Pengujian Kontroler PI dengan Parameter <i>Plant</i> Berubah..	54
Gambar 4.7 Pengujian Kontroler PI-Fuzzy <i>Auto-tuner</i> dengan Parameter <i>Plant</i> Tetap	55
Gambar 4.8 Respon Temperatur Uap <i>Superheater</i> dengan Perubahan Beban	56
Gambar 4.9 Perubahan Parameter K_p	57
Gambar 4.10 Perubahan Parameter T_i	57
Gambar 4.11 Respon Perbandingan Kontroler PI konvensional dan PI- <i>Fuzzy Auto-tuner</i>	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Keterangan Simbol P&ID	10
Tabel 2.2 Korelasi nilai temperatur dan entalpi pada <i>desuperheater</i>	14
Tabel 2.3 Aturan penalaan kontroler PID Ziegler-Nichols metode pertama	25
Tabel 2.4 Aturan penalaan kontroler PID Ziegler-Nichols metode kedua	26
 Tabel 3.1 Parameter sistem pengaturan temperatur uap <i>desupeheater</i> [1]	35
Tabel 3.2 Parameter sistem pengaturan temperatur uap <i>secondary superheater</i> [1]	37
Tabel 3.3 Kriteria beban laju aliran uap	39
Tabel 3.4 Hasil pemodelan pada tiap variasi beban	40
Tabel 3.5 Nilai parameter PI dengan metode Ziegler-Nichols	41
Tabel 3.6 Parameter kontroler tiap beban	43
Tabel 3.7 Basis aturan parameter K_p	47
Tabel 3.8 Basis aturan parameter τ_i	47
Tabel 4.1 Spesifikasi respon sistem menggunakan kontroler PI dengan parameter <i>plant</i>	53
Tabel 4.2 Spesifikasi respon sistem menggunakan kontroler PI-Fuzzy <i>Auto-tuner</i> dengan parameter <i>plant</i>	55
Tabel 4.3 Perbandingan kontroler PI dan PI-Fuzzy <i>Auto-tuner</i>	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

NOMENKLATUR

Simbol	Keterangan	Satuan
\dot{m}	Laju massa	kg/s
V	Volume uap	m ³
C	<i>Specific heat</i>	kJ/kg K
h	Entalpi	kJ/kg
T	Temperatur	°C
ρ	Kerapatan	kg/m ³
a	<i>Area heat transfer Sec. Superheater (SHS)</i>	m ²
α	Koefisien <i>heat transfer</i> SHS	kJ/(hr.m ² .°C)
\dot{Q}	Energi kalor	kJ/s
M	Massa	kg
Indeks	Keterangan	
s	<i>Steam</i>	-
shs	<i>Secondary superheater</i>	-
c	<i>Combustion</i>	-
d	<i>Desuperheater</i>	-
shp	<i>Primary superheater</i>	-
$spray$	<i>Spray water (air injeksi)</i>	-
m	<i>Permukaan pipa</i>	-
i	<i>Inside</i>	-
ms	<i>Metal to steam</i>	-

<i>g</i>	<i>Gas buang</i>	-
<i>system</i>	Sistem	-
<i>in</i>	Masuk	-
<i>out</i>	Keluar	-
<i>conv_shs</i>	Transfer panas secara konveksi pada <i>sec. superheater</i>	-
<i>gm</i>	Gas buang ke permukaan pipa <i>superheater</i>	-

BAB 1

PENDAHULUAN

Pada Bab ini dibahas mengenai latar belakang dilakukannya penelitian, permasalahan yang akan diselesaikan, dan tujuan dilakukannya penelitian ini. Metodologi penelitian dan sistematika penulisan juga dibahas pada Bab ini. Untuk mengetahui kegunaan penelitian ini pada industri, dapat dilihat pada subbab relevansi.

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan energi potensial uap sebagai penggerak utama (*prime mover*) turbin. Uap tersebut dihasilkan melalui proses pemanasan air di dalam sistem *boiler*.

Superheater merupakan bagian di dalam sistem *boiler* yang berfungsi memanaskan uap jenuh hingga menjadi uap kering. Uap jenuh adalah uap yang berasal dari *steam drum*, uap ini memiliki tingkat kelembaban yang tinggi, sedangkan uap kering atau bisa disebut uap *superheater* adalah uap yang memiliki tingkat kelembaban yang rendah dan temperatur tinggi. Uap *superheater* harus dikontrol agar menghasilkan temperatur yang sesuai dengan *setpoint*. Pengaturan temperatur uap merupakan salah satu pengaturan yang tergolong sulit di dalam sistem pengaturan *boiler*. Hal ini dikarenakan temperatur uap memiliki respon waktu yang lama dan bersifat tidak linier [1]. Perubahan beban pembangkit akibat permintaan daya listrik yang bervariasi menimbulkan naik turunnya aliran uap yang mengalir pada *superheater*, akibatnya temperatur uap *superheater* menjadi naik turun juga. Temperatur uap yang terlalu panas dapat menyebabkan terjadinya *overheating* pada pipa-pipa *superheater*, sebaliknya jika temperatur uap yang terlalu rendah menyebabkan rusaknya sudu-sudu turbin. Laju uap yang bervariasi ini menyebabkan uap tidak menerima dengan sempurna panas dari gas buang, sehingga temperatur uap tidak tetap pada *setpoint* yang ditentukan. Oleh karena itu dibutuhkan kontroler yang mengatur agar mempertahankan nilai temperatur pada *setpoint* yang ditentukan.

Kontroler yang secara luas digunakan di industri adalah kontroler PID karena memiliki struktur sederhana, mudah diaplikasikan, dan mudah digunakan. Namun, *plant* temperatur uap *superheater* memiliki sifat *time-delay* dan sifat tidak linear. Jadi, untuk membuat model

dinamika kontroler PID yang tepat tergolong susah. Umumnya, dalam membuat model tersebut membutuhkan proses *trial and error* untuk mendapatkan respon kontrol yang bagus. Ketika sistem mendapatkan gangguan, respon transien dari sistem tersebut akan memburuk. Dibutuhkan operator untuk mengatur ulang atau mengganti *mode* menjadi pengaturan manual. *Fuzzy control* telah berhasil diterapkan pada banyak industri proses. Parameter dari PID dapat diatur secara otomatis berdasarkan kondisi sistem. Hal itu dapat memberikan respon yang cepat, dan *overshoot* kecil dari pada menggunakan kontroler PID konvensional.

1.2 Perumusan Masalah

Perubahan beban pada pembangkit menyebabkan aliran uap *superheater* bervariasi. Jika beban pembangkit listrik bertambah, maka aliran uap dalam *superheater* semakin besar, sehingga menyebabkan nilai temperatur uap yang dihasilkan menurun. Ketika beban pembangkit listrik berkurang, aliran uap dalam *superheater* semakin kecil, sehingga nilai temperatur uap yang dihasilkan akan semakin meningkat.

Temperatur uap *superheater* yang ditentukan pada pembangkit berkapasitas 500 MW adalah 541°C. ketika terdapat gangguan, maksimum penyimpangan temperatur adalah sebesar $\pm 10^\circ\text{C}$ dari *setpoint*. Pada umumnya pembangkit menggunakan kontroler PID yang memiliki nilai parameter spesifik pada satu kondisi saat mengatur temperatur uap *superheater*. Gangguan yang disebabkan oleh aliran uap yang bervariasi pada *superheater* menyebabkan kondisi sistem berubah, sehingga nilai parameter kontroler membutuhkan penalaan ulang agar memenuhi spesifikasi kondisi yang baru. Diperlukan penelitian tentang perancangan kontroler yang mampu melakukan penalaan secara otomatis untuk meningkatkan performa sistem.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini menggunakan model matematis dari *first principle* untuk menguji metode pengaturan yang diusulkan. Sistem pengaturan temperatur uap *superheater* menggunakan metode *cascade*, sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater* sebagai *inner loop* dan sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater* sebagai *outer loop*. Pengujian dilakukan pada simulator *plant* yang dibuat pada *software* LabVIEW dan MATLAB Simulink. Kontroler yang digunakan adalah PI-Fuzzy Auto-tuner, dimana masukan *fuzzy* berupa laju aliran uap dan *delta* laju aliran uap. Beban yang diujikan antara 50%-100% dari beban

maksimum. Gangguan yang terjadi diasumsikan hanya dari perubahan laju aliran uap. Terdapat beberapa nilai variabel yang diasumsikan konstan karena telah dikontrol pada sistem pengaturan lain, diantaranya:

- Entalpi uap *primary superheater*
- Entalpi air injeksi
- Tekanan pada *steam drum*
- Temperatur gas buang pada *furnace*

1.4 Tujuan Penelitian

Rancangan kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner diterapkan pada sistem pengaturan temperatur uap *superheater* untuk menjaga nilai temperatur berada pada nilai *setpoint* ketika terdapat gangguan berupa laju aliran uap yang melewati *superheater*.

1.5 Metodologi

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap, diantaranya studi literatur, pemodelan *superheater*, linierisasi model, perancangan kontroler PI, perancangan kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner, pengujian dan analisis serta penulisan buku laporan penelitian. Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan teori penunjang dari buku dan jurnal. Model *plant* dan spesifikasi yang diinginkan menjadi dasar perancangan kontroler PI dan PI-Fuzzy Auto-tuner. Pengujian dilakukan dengan menganalisis performa sistem konfigurasi *open loop* dengan kontroler PI untuk *inner loop* dan *outer loop*, konfigurasi *cascade* dengan kontroler PI, dan dengan kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner pada *outer loop*. Kontroler diterapkan pada simulator sebagai media pembelajaran tentang sistem pengaturan temperatur uap *superheater* serta aplikasi kecerdasan buatan pada sistem pengaturan di industri.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan penelitian ini dapat dijelaskan dengan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi, sistematika penulisan dan relevansi dari penelitian yang dilakukan.

BAB 2 SISTEM PENGATURAN TEMPERATUR UAP *SUPER-HEATER* PADA PLTU

Konsep dan teori yang mendasari penelitian ini meliputi PLTU, Pemodelan *superheater*, teknik linearisasi, sistem pengaturan temperatur uap *superheater*, konfigurasi *cascade*, kontroler PI, aturan tuning Ziegler-Nichols, *anti-windup*, kontroler dengan mode *tracking*, logika *fuzzy*, dan kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* dijelaskan pada bab ini.

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini dijelaskan mengenai pemodelan sistem, linearisasi model, perancangan kontroler PI dan *PI-Fuzzy Auto-tuner*.

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini membahas tentang hasil simulasi sistem menggunakan kontroler PI dan *PI-Fuzzy Auto-tuner*, analisis performa sistem terhadap gangguan.

BAB 5 KESIMPULAN

Bab 5 membahas tentang kesimpulan berkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Gangguan pada sistem pengaturan temperatur uap sering ditemukan di industri, terutama pada pembangkit yang menggunakan tenaga uap. Kontroler diharapkan mampu mengatasi terjadinya gangguan agar respon sistem memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Pada penelitian ini dirancang kontroler PI yang mampu mengatasi gangguan melalui mekanisme penalaan parameter menggunakan logika *fuzzy*. Hasil rancangan dapat menjadi media pembelajaran untuk menggambarkan sistem pengaturan temperatur uap pada *real plant* di industri. Selain itu, dapat digunakan sebagai media pembelajaran aplikasi kecerdasan buatan pada sistem pengaturan di industri.

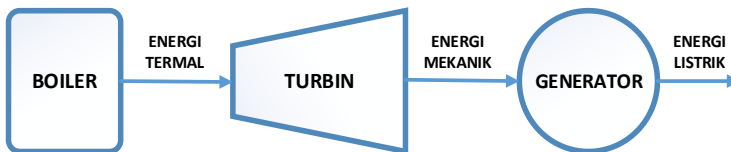
BAB 2

SISTEM PENGATURAN TEMPERATUR UAP *SUPERHEATER* PADA PLTU

Bab 2 menjelaskan mengenai proses yang terjadi pada pembangkit listrik tenaga uap, komponen *superheater* dan *desuperheater*, dan sistem pengaturan temperatur uap. Pemodelan komponen-komponen yang menyusun sistem pengaturan temperatur uap juga dibahas pada Bab ini. Agar sistem pengaturan bekerja dengan baik, maka pada bab ini dibahas mengenai dasar teori mengenai kontroler yang digunakan pada penelitian ini.

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

PLTU merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan energi kinetik uap sebagai penggerak utama turbin untuk menghasilkan energi listrik. Terjadi beberapa tahap perubahan energi hingga menghasilkan energi listrik yaitu energi termal menjadi energi mekanik, kemudian energi mekanik menjadi energi listrik. Energi termal dihasilkan oleh sistem *boiler*, energi mekanik dihasilkan oleh turbin, dan energi listrik dihasilkan oleh generator. Skema proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.



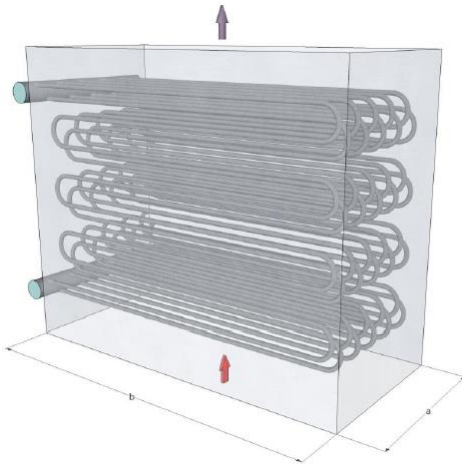
Gambar 2.1 Proses perubahan energi pada PLTU

Dalam menghasilkan uap, *boiler* menggunakan bahan bakar berupa batu bara untuk memanaskan air. Uap yang dihasilkan oleh *boiler* digunakan untuk memutar turbin, setelah digunakan untuk memutar turbin, uap diubah kembali menjadi air melalui proses kondensasi. Air yang sudah terkondensasi dipanaskan untuk digunakan kembali. Siklus ini berlangsung terus-menerus sehingga membentuk siklus tertutup. Sistem pembangkit tersebut dalam memproduksi listrik dapat dikelompokkan menjadi empat proses utama sebagai berikut:

- 1) Sistem penanganan batu bara dan abu (*coal and ash handling system*)
- 2) Sistem pengolahan air (*water treatment system*)
- 3) Sistem air dan uap (*water and steam system*)
- 4) Sistem udara dan gas (*air and gas system*)

2.2 Superheater dan Desuperheater

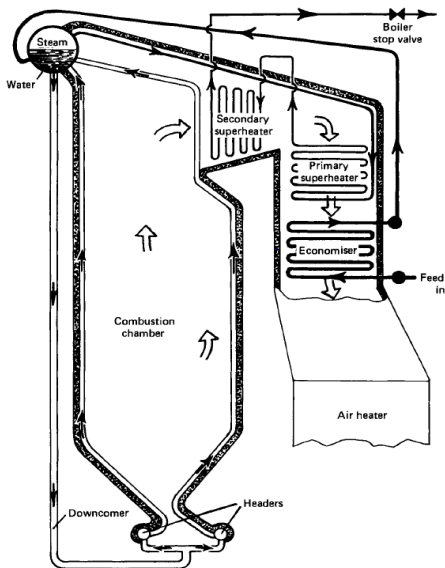
Superheater merupakan bagian di dalam sistem *boiler* yang berfungsi memanaskan uap jenuh (*saturated steam*) hingga menjadi uap kering (*superheated steam*) melalui proses pertukaran panas antara panas gas buang yang berasal dari pembakaran dengan uap. Uap jenuh adalah uap yang berasal dari *steam drum*, uap ini memiliki tingkat kelembaban yang tinggi, sedangkan uap kering atau bisa disebut uap *superheater* adalah uap yang memiliki tingkat kelembaban yang rendah dan temperatur tinggi. Ilustrasi *superheater* secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi *superheater* secara umum

Superheater terdiri menjadi dua bagian, yaitu *primary superheater* dan *secondary superheater*, keduanya terletak di dalam ruang pembakaran (*furnace*). Uap jenuh yang berasal dari *steam drum* dipanaskan di dalam *primary superheater*, uap jenuh memiliki nilai temperatur sekitar 354°C dipanaskan di *primary superheater* hingga mencapai nilai sekitar 400°C. *Primary superheater* terletak jauh dari pusat

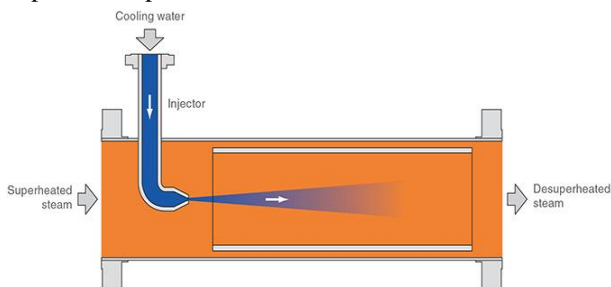
pembakaran sehingga nilai temperatur gas buang sudah jauh berkurang dibanding dengan nilai temperatur gas buang pada pusat pembakaran. Dari *primary superheater*, uap masuk ke *secondary superheater* untuk dipanaskan kembali hingga mencapai nilai temperatur yang telah ditentukan yaitu 541°C , selanjutnya uap keluaran *secondary superheater* digunakan untuk memutar turbin. Letak *secondary superheater* dekat dengan pusat pembakaran, sehingga nilai temperatur gas buang tidak jauh berbeda dengan nilai temperatur gas buang pada pusat pembakaran. Letak *superheater* di dalam ruang pembakaran ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Letak *superheater* di dalam ruang pembakaran

Untuk mendinginkan uap yang terlalu panas terdapat komponen yang disebut *desuperheater*. Komponen ini berfungsi menginjeksikan air untuk mendinginkan uap *superheater*. Berbeda dengan *superheater*, *desuperheater* terletak di luar ruang pembakaran. Sebelum masuk ke *secondary superheater*, dari *primary superheater* uap masuk terlebih dahulu ke dalam *desuperheater*. Pada *desuperheater*, uap diberi air injeksi (*water spray*) untuk menurunkan nilai temperaturnya. Air injeksi akan diinjeksikan ke uap jika temperatur uap terlalu tinggi. Air yang digunakan

adalah *feedwater* yang berasal dari *economizer*. Ilustrasi *desuperheater* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Ilustrasi *desuperheater*

Dari *primary superheater* uap masuk ke dalam *desuperheater*, *desuperheater* berfungsi menginjeksikan air kepada uap panas dari *primary superheater* saat temperatur uap melebihi *set point* yang ditentukan. Setelah melewati *desuperheater*, uap masuk ke *secondary superheater*, di dalam *secondary superheater* uap dipanaskan hingga mencapai *setpoint* yang ditentukan.

2.3 Sistem Pengaturan Temperatur Uap *Superheater*

Temperatur uap *superheater* harus dijaga pada nilai 541°C , temperatur uap yang terlalu tinggi ($580^{\circ}\text{C} - 660^{\circ}\text{C}$) dapat membahayakan permukaan dinding *boiler* dan sudu-sudu turbin karena terlalu panas (*overheating*). Sebaliknya, jika temperatur terlalu rendah, kelembaban yang terkandung pada uap dapat menurunkan efisiensi dan menyebabkan kerusakan pada turbin [2].

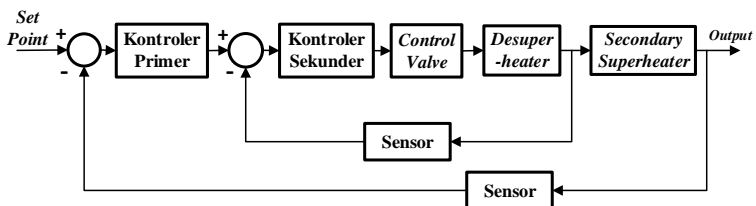
Temperatur uap *superheater* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti aliran uap, kondisi pembakaran, temperatur gas buang, temperatur *feedwater* pada boiler, terak (*slagging*) pada permukaan pipa *superheater*, dan lainnya. Faktor yang paling berpengaruh adalah aliran uap yang melewati *superheater*, perpindahan panas uap dan air injeksi [3]. Laju aliran uap yang melewati *superheater* bervariasi mengikuti besarnya beban permintaan daya. Jika permintaan daya tinggi maka aliran uap yang mengalir pada *superheater* juga meningkat, sebaliknya jika permintaan daya rendah, maka aliran uap yang mengalir juga menurun. Laju uap yang bervariasi ini menyebabkan uap tidak menerima dengan sempurna panas dari gas buang, sehingga temperatur uap tidak tetap pada *setpoint* yang

ditentukan. Oleh karena itu diterapkan sistem pengaturan yang mengatur agar temperatur uap tetap pada *setpoint* yang ditentukan.

2.3.1 Konfigurasi *Cascade*

Sistem pengaturan dengan menggunakan konfigurasi *cascade* memiliki dua atau lebih *loop* pengaturan yang saling berkesinambungan. Terdiri atas *inner loop* dan *outer loop*. Masing-masing memiliki kontroler, kontroler primer dan kontroler sekunder. Sinyal kontrol yang dihasilkan oleh kontroler primer pada *outer loop* menjadi *set point* untuk *inner loop*. Konfigurasi sistem ini memiliki dua buah *measurement system* (sensor) dan hanya satu *actuator*. Syarat penerapan konfigurasi *cascade* yaitu yang pertama, gangguan harus terdapat pada *inner loop*, agar dapat dikontrol oleh kontroler sekunder. Kedua, *inner loop* harus memiliki respon yang lebih cepat dari pada *outer loop*.

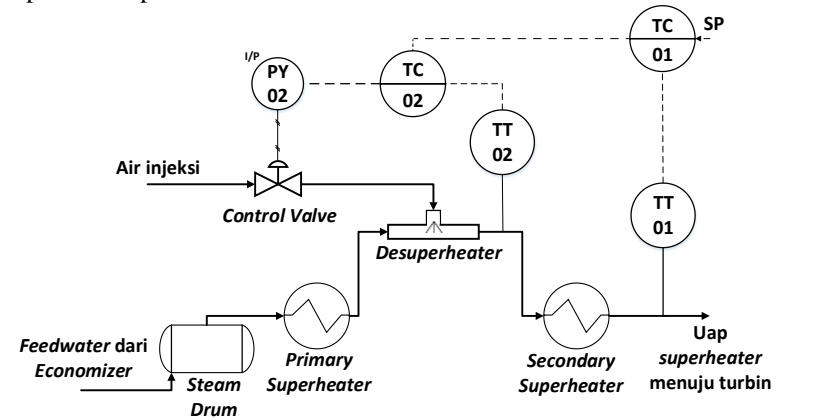
Sistem pengaturan temperatur uap *superheater* menggunakan konfigurasi *cascade*, sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater* sebagai *inner loop* dan sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater* sebagai *outer loop*. Tujuan penerapan konfigurasi ini adalah adalah untuk mengatur nilai temperatur uap *secondary superheater* (*outer loop*) agar sesuai *set point* yang ditentukan dan melemahkan pengaruh dari gangguan perubahan laju uap yang terjadi pada *desuperheater* (*inner loop*). Diagram blok konfigurasi *cascade* sistem pengaturan temperatur uap *superheater* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram blok konfigurasi *cascade* sistem pengaturan temperatur uap *superheater*

Dapat dilihat Pada Gambar 2.5, sinyal kontrol dari kontroler primer pengaturan temperatur uap *secondary superheater* menjadi masukan atau *setpoint* kepada sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater* (*inner loop*) menunjukkan sistem pengaturan temperatur uap *cascade*. Kontroler sekunder memberikan sinyal kontrol kepada aktuatur berupa *control*

valve yang memberikan keluaran berupa aliran air injeksi untuk mendinginkan uap pada *desuperheater*. *Piping & Instrumentation Diagram* (P&ID) untuk sistem pengaturan temperatur uap *superheater* dapat dilihat pada Gambar 2.6. Keterangan simbol P&ID yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.6 P&ID sistem pengaturan temperatur uap superheater

Tabel 2.1 Keterangan Simbol P&ID

Simbol	Keterangan	Simbol	Keterangan
	Drum		Control valve
	Heat Exchanger		Spray nozzle
	Temperature Transmitter on Field		Process line
	Temperature Control on central control		Sinyal elektrik (arus)
	Konversi Arus ke Pressure		Sinyal pneumatik

Steam drum, *primary superheater*, dan *secondary superheater* terletak di dalam *furnace*. *Steam drum* merupakan komponen yang digunakan untuk memisahkan uap dan air. Keluaran *steam drum* adalah uap jenuh yang memiliki kelembapan tinggi yang kemudian dipanaskan di *primary superheater*, setelah itu uap dialirkan keluar dari *furnace*

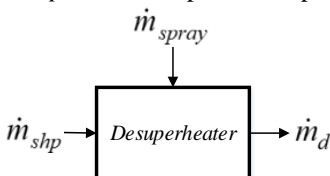
menuju *desuperheater*, disini uap didinginkan dengan cara menginjeksi air kedalam *desuperheater*. Jumlah air yang diinjeksikan diatur oleh *control valve*. Kemudian uap dialirkan ke dalam *furnace* kembali menuju *secondary superheater* untuk dipanaskan, uap hasil pemanasan ini digunakan untuk memutar turbin.

Sensor temperatur TT1 berfungsi mengukur temperatur uap *secondary superheater* dan mengirimkan ke kontroler primer TC1 dalam bentuk sinyal arus. Keluaran TC1 menjadi *setpoint* dari kontroler sekunder TC2. TC2 juga menerima masukan temperatur *desuperheater* yang dikirim oleh sensor temperatur TT2. TC2 mengatur *control valve*.

Sistem pengaturan *secondary superheater* digunakan untuk menaikkan temperatur uap hingga mencapai *setpoint*, sedangkan sistem pengaturan *desuperheater* digunakan untuk menurunkan temperatur uap. Perubahan yang terjadi pada temperatur uap *desuperheater* mempengaruhi temperatur uap keluaran *secondary superheater*. Nilai temperatur uap antara *desuperheater* sebanding dengan temperatur uap *secondary superheater*, jika temperatur uap *desuperheater* turun, maka temperatur uap *secondary superheater* juga turun dengan perbedaan nilai temperatur.

2.3.2 Pemodelan *Desuperheater*

Pemodelan *desuperheater* menggunakan hukum kesetimbangan massa dan hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada *desuperheater*. Proses terjadinya kesetimbangan massa disebabkan oleh pencampuran laju uap yang berasal dari *primary superheater* dengan laju air injeksi yang berasal dari *control valve*. Pencampuran dua laju massa tersebut menyebabkan terjadinya kesetimbangan energi panas yang disebabkan oleh pencampuran energi panas dari *primary superheater* dengan air injeksi. Skema pemodelan hukum kesetimbangan massa pada *desuperheater* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema pemodelan hukum kesetimbangan massa pada *desuperheater*

Persamaan hukum kesetimbangan massa yang terjadi pada *desuperheater* ditunjukkan pada pada Persamaan (2.1) sampai (2.4) [4] [5].

$$\begin{bmatrix} \text{Perubahan laju akumulasi} \\ \text{massa} \\ \text{pada sistem} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Laju massa} \\ \text{yang masuk} \\ \text{ke sistem} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Laju massa} \\ \text{yang keluar} \\ \text{dari sistem} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

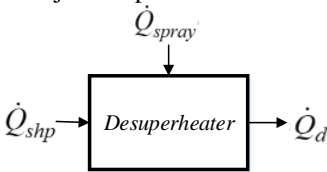
$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_d) = \dot{m}_{shp}(t) - \dot{m}_d(t) + \dot{m}_{spray}(t) \quad (2.2)$$

Karena perubahan jumlah air injeksi yang berada di dalam *desuperheater* sangat kecil, maka perubahan massa yang terjadi dapat diabaikan [6], maka persamaan (2.2) menjadi (2.4).

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_d) = \dot{m}_{shp}(t) - \dot{m}_d(t) + \dot{m}_{spray}(t) \cong 0, \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_d(t) = \dot{m}_{shp}(t) + \dot{m}_{spray}(t) \quad (2.4)$$

Sedangkan persamaan hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada *desuperheater* dapat dilihat pada Persamaan (2.5) sampai (2.11). Skema pemodelan hukum kesetimbangan energi pada *desuperheater* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema pemodelan hukum kesetimbangan energi pada *desuperheater*

$$\begin{bmatrix} \text{Laju akumulasi} \\ \text{energi} \\ \text{pada sistem} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Laju energi} \\ \text{yang masuk} \\ \text{ke sistem} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Laju energi} \\ \text{yang keluar} \\ \text{dari sistem} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt} \dot{Q}_{system} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} \quad (2.6)$$

Laju akumulasi energi yang terjadi di dalam sistem *desuperheater* ditunjukkan pada Persamaan (2.7).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \dot{Q}_{system} &= \frac{d}{dt} (V_d \rho_s h_d(t)) \\ &= V_d \rho_s \frac{dh_d(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Persaman energi yang masuk ke dalam sistem ditunjukkan pada Persamaan (2.8).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in} &= \dot{Q}_{shp} + \dot{Q}_{spray} \\ &= \dot{m}_{shp}(t) h_{shp} + \dot{m}_{spray}(t) h_{spray} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Nilai entalpi uap *primary superheater* dan *air injeksi* diasumsikan konstan karena telah diatur pada sistem pengaturan sebelumnya. Nilai entalpi uap *primary superheater* telah diatur pada sistem pengaturan *steam drum*, sedangkan entalpi air injeksi sudah diatur pada sistem pengaturan *economizer*. Persaman energi yang keluar dari dalam sistem ditunjukkan pada Persamaan (2.9).

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_d = \dot{m}_d(t) h_d(t) \quad (2.9)$$

Substitusi Persamaan (2.7), (2.8), dan (2.9) ke Persamaan (2.6), maka dihasilkan Persamaan (2.10).

$$V_d \frac{d}{dt} (\rho_s h_d(t)) = \dot{m}_{shp}(t) h_{shp} + \dot{m}_{spray}(t) h_{spray} - \dot{m}_d(t) h_d(t) \quad (2.10)$$

Substitusi Persamaan (2.4) kepada Persamaan (2.10), maka menjadi Persamaan (2.11).

$$V_d \rho_s \frac{dh_d(t)}{dt} = \dot{m}_{shp}(t) h_{shp} + \dot{m}_{spray}(t) h_{spray} - (\dot{m}_{shp}(t) + \dot{m}_{spray}(t)) h_d(t) \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) menghasilkan keluar berupa entalpi uap *desuperheter*. Digunakan metode regresi linier untuk mengubah entalpi menjadi temperatur. Nilai korelasi antara entalpi dan temperatur uap diperoleh dari tabel uap yang ditunjukkan pada Tabel 2.2. Metode regresi linier untuk memperoleh nilai temperatur uap dari entalpi uap ditunjukkan pada Persamaan (2.12).

$$\begin{bmatrix} n & \sum h_{d_i} \\ \sum h_{d_i} & \sum h_{d_i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum T_{d_i} \\ \sum h_{d_i} T_{d_i} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Persamaan regresi linear untuk mengubah entalpi menjadi temperatur uap *desuperheater* ditunjukkan pada Persamaan (2.13).

$$T_d = ah_d + b \quad (2.13)$$

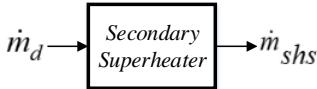
Tabel 2.2 Korelasi nilai temperatur dan entalpi pada *desuperheater*

$T_d (^{\circ}C)$	$h_d (^{\circ}kJ / kg)$
303.15	2743.73
325	2858.43
350	2958.25
400	3119.44
450	3258.48
500	3387.77
550	3512.25
600	3634.35
650	3755.42
700	3876.28

2.3.3 Pemodelan *Secondary Superheater*

Superheater memanfaatkan panas dari gas buang untuk memanaskan uap *superheater*. Pada *secondary superheater* terjadi kenaikan temperatur uap yang disebabkan adanya perpindahan panas dari

gas buang ke pipa *superheater* untuk memanaskan uap. Pemodelan *superheater* menggunakan hukum kesetimbangan massa yang terjadi pada *superheater*, skema pemodelan hukum kesetimbangan massa pada *secondary superheater* ditunjukkan pada Gambar 2.9. Hukum kesetimbangan massa pada *secondary superheater* ditunjukkan pada Persamaan (2.15) [6].



Gambar 2.9 Skema pemodelan hukum kesetimbangan massa pada *secondary superheater*

$$\begin{bmatrix} \text{Laju akumulasi} \\ \text{massa pada} \\ \text{sistem} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Laju massa} \\ \text{yang masuk} \\ \text{ke sistem} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Laju massa} \\ \text{yang keluar} \\ \text{dari sistem} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_{shs}) = \dot{m}_d - \dot{m}_{shs} \quad (2.15)$$

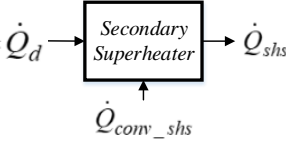
Perubahan massa di dalam *secondary superheater* diabaikan karena temperatur uap melebihi temperatur saturasi [6]. Persamaan (2.15) menjadi Persamaan (2.17).

$$\dot{m}_d - \dot{m}_{shs} \cong 0 \quad (2.16)$$

Atau

$$\dot{m}_d = \dot{m}_{shs} \quad (2.17)$$

Sedangkan kesetimbangan energi pada *secondary superheater* ditunjukkan pada Persamaan (2.19) [1]. Skema pemodelan hukum kesetimbangan energi pada *secondary superheater* ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Skema pemodelan hukum kesetimbangan energi pada *secondary superheater*

$$\begin{bmatrix} \text{Laju akumulasi} \\ \text{energi} \\ \text{pada sistem} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Laju energi} \\ \text{yang masuk} \\ \text{ke sistem} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Laju energi} \\ \text{yang keluar} \\ \text{dari sistem} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\frac{d}{dt} \dot{Q}_{system} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} \quad (2.19)$$

Laju akumulasi energi yang terjadi di dalam sistem *secondary superheater* ditunjukkan pada Persamaan (2.20)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \dot{Q}_{system} &= \frac{d}{dt} (V_{shs} \rho_s C_p T_{shs}(t)) \\ &= V_{shs} \rho_s C_p \frac{dT_{shs}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Persaman energi yang masuk ke dalam sistem ditunjukkan pada Persamaan (2.22)

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_d + \dot{Q}_{conv_shs} \quad (2.21)$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_d(t) h_d(t) + a_i \alpha_{ms} (T_m(t) - T_{shs}(t)) \quad (2.22)$$

Persamaan energi yang keluar dari sistem ditunjukkan pada persamaan (2.23)

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{shs} = \dot{m}_{shs}(t) h_{shs}(t) \quad (2.23)$$

Substitusi Persamaan (2.20), (2.22), dan (2.23) ke Persamaan (2.19), maka dihasilkan Persamaan (2.24)

$$V_d \rho_s C_p \frac{dT_{shs}(t)}{dt} = \dot{m}_d(t) h_d(t) - \dot{m}_{shs}(t) h_{shs}(t) + a_i \alpha_{ms} (T_m(t) - T_{shs}(t)) \quad (2.24)$$

Pada Persamaan (2.17) diketahui $\dot{m}_d = \dot{m}_{shs}$ maka Persamaan (2.24) menjadi Persamaan (2.25).

$$V_{shs} \rho_s C_p \frac{dT_{shs}(t)}{dt} = \dot{m}_d(t) (h_d(t) - h_{shs}(t)) + a_i \alpha_{ms} (T_m(t) - T_{shs}(t)) \quad (2.25)$$

Dimana,

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta h = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2.26)$$

Maka, persamaan (2.25) menjadi

$$V_{shs} \rho_s C_p \frac{dT_{shs}(t)}{dt} = \dot{m}_d(t) C_p (T_d(t) - T_{shs}(t)) + a_i \alpha_{ms} (T_m(t) - T_{shs}(t)) \quad (2.27)$$

Uap *secondary superheater* memperoleh panas melalui proses transfer panas secara konveksi dari permukaan pipa *superheater* kepada uap. Sedangkan panas permukaan pipa *superheater* $T_m(t)$ diperoleh dari transfer panas secara konveksi dari gas buang hasil pembakaran pada *furnace*. Dinamika perubahan temperatur permukaan pipa $T_m(t)$ dapat dimodelkan menggunakan hukum kesetimbangan energi yang ditunjukkan pada Persamaan (2.9), temperatur gas buang diasumsikan konstan.

$$\frac{d}{dt} \dot{Q}_m = \dot{Q}_{gm} - \dot{Q}_{ms} \quad (2.28)$$

$$M_m C_m \frac{dT_m(t)}{dt} = a_o \alpha_{gm} (T_g - T_m(t)) - a_i \alpha_{ms} (T_m(t) - T_{shs}(t)) \quad (2.29)$$

2.3.4 Pemodelan Sensor Temperatur

Sensor temperatur yang digunakan adalah sensor termokopel tipe E. Pemodelan sensor bertujuan untuk memperoleh nilai penguatan peralatan tersebut yang disimbolkan dengan K_T . Penguatan sensor dapat dihitung melalui Persamaan (2.30).

$$K_T = \frac{\text{Rentang Arus keluaran (mA)}}{\text{Rentang temperatur uap pada superheater (C)}} \quad (2.30)$$

2.3.5 Pemodelan Control Valve

Control valve berfungsi mengatur aliran air yang digunakan untuk menginjeksikan air ke dalam *desuperheater*, air yang diinjeksikan digunakan untuk mendinginkan uap. Pada penelitian ini *control valve* yang digunakan adalah *control valve* tipe diafragma. Model *control valve* ditunjukkan pada Persamaan (2.31).

$$G_v(s) = \frac{M(s)}{U(s)} = \frac{K_v}{T_{cv}s + 1} \quad (2.31)$$

Dimana,

K_v : *gain total control valve*

T_{cv} : *time constant control valve* (detik)

Untuk mendapatkan *gain control valve*, dapat diperoleh menggunakan Persamaan (2.32).

$$K_v = G_c \cdot K_c \quad (2.32)$$

Dimana,

K_c : *gain valve*

G_c : *gain I/P*

Gain valve K_c dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan (2.33).

$$K_c = \frac{\text{Rentang laju aliran (kg/s)}}{\text{Rentang tekanan (psi)}} \quad (2.33)$$

Untuk mendapatkan *gain I/P* menggunakan persamaan (2.34)

$$G_c = \frac{\text{Rentang tekanan keluaran (psi)}}{\text{Rentang arus masukan (mA)}} \quad (2.34)$$

Untuk besarnya *time constant* diperoleh melalui persamaan (2.35)

$$T_{cv} = T_v (\Delta V + R_v) \quad (2.35)$$

dimana,

ΔV : Fraksi massa perubahan *control valve*

R_v : Perbandingan *time constant inherent* dengan *time stroke*

T_v dapat diperoleh dari persamaan (2.36)

$$T_v = \frac{Y_c}{C_v} \quad (2.36)$$

Dimana,

Y_c : faktor *stroking time valve*

C_v : koefisien *control valve*

2.4 Linearisasi

Sistem diklasifikasikan menjadi beberapa macam. Berdasarkan sifat linearitasnya sistem dibagi menjadi dua macam, yaitu sistem linear dan sistem nonlinear. Sistem dikatakan linear apabila memenuhi prinsip superposisi. Prinsip superposisi adalah respon yang dihasilkan dari beberapa sinyal masukan sama dengan jumlah respon keluaran untuk masing-masing sinyal masukan [7]. Dengan begitu, sistem dikatakan nonlinear atau tidak linear apabila tidak memenuhi prinsip superposisi. Sistem nonlinear memiliki sifat yang tidak tetap, mudah berubah, sulit dikontrol, dan sulit diprediksi. Selain itu, sistem nonlinear memiliki perilaku kualitatif, yaitu mempunyai nilai ekuilibrium lebih dari satu.

Digunakan sistem linearisasi untuk menyelesaikan permasalahan nonlinearitas dengan melakukan pendekatan terhadap daerah kerja terbatas. Pada penelitian ini, proses linearisasi menggunakan pendekatan deret Taylor.

Misal fungsi $f(x)$ dengan variable tunggal x , pendekatan dilakukan di sekitar nilai *steady-state* (\bar{x}), sehingga $f(\bar{x}) = 0$. Dalam kasus ini, \bar{x} disebut titik ekuilibrium dari sistem. Sistem dapat direpresentasikan pada Persamaan (2.37)

$$\frac{dx}{dt} = f(\bar{x}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})^2 + \text{orde tinggi} \quad (2.37)$$

Pada saat *steady-state*

$$\frac{dx}{dt} = f(\bar{x}) = 0 \quad (2.38)$$

Dengan melakukan pendekatan orde pertama maka diperoleh model seperti pada Persamaan (2.39).

$$\frac{dx}{dt} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) \quad (2.39)$$

Jika sistem yang digunakan adalah memiliki beberapa variabel seperti Persamaan (2.40) maka pendekatan orde pertama menjadi (2.41).

$$\frac{du}{dt} = f(x_1, x_2, u) \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & f(x_1, x_2, u) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x_1, \bar{x}_2, \bar{u}} (u - \bar{u}) + \\ & \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x_1, \bar{x}_2, \bar{u}} (x_1 - \bar{x}_1) + \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{x_1, \bar{x}_2, \bar{u}} (x_2 - \bar{x}_2) \end{aligned} \quad (2.41)$$

2.5 Metode Validasi

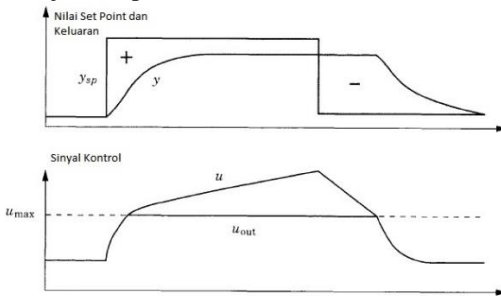
Metode validasi digunakan untuk mengevaluasi model hasil identifikasi dengan cara membandingkannya dengan model hasil penurunan hukum fisisnya. Terdapat beberapa metode validasi yang sering digunakan. Pemilihan penggunaan metode tersebut disesuaikan dengan letak kesalahan antara beberapa model yang dibandingkan. Model dengan total kesalahan terkecil berarti model yang paling valid untuk digunakan. Metode yang diterapkan pada penelitian ini menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE).

RMSE baik diaplikasikan untuk melihat performansi model yang memiliki kesalahan terdistribusi atau gaussian. Rumus untuk kriteria di atas tercantum pada persamaan (2.42).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (2.42)$$

2.6 Anti-Windup [8]

Walaupun banyak aspek dari sistem pengaturan dapat dipahami berdasarkan teori linier, namun beberapa efek *nonlinear* juga harus dipertimbangkan. Semua aktuator memiliki batas, seperti *control valve* yang tidak bisa membuka lebih dari 100% dan tidak bisa menutup kurang dari 0%. Ketika sinyal kontrol mencapai batas aktuator, umpan balik menjadi tidak berfungsi lagi karena aktuator akan tetap pada batasnya. Ketika hal ini terjadi dan masih terdapat *error*, jika kontroler menggunakan aksi integral, maka *error* akan diintegrasikan secara terus-menerus. Ini berarti hasil integral nya menjadi sangat besar, atau bisa disebut dengan *integral windup*. Dibutuhkan nilai *error* yang berubah polaritasnya, sehingga keluaran kontroler akan kembali dalam rentang saturasi aktuator. Namun sinyal keluaran kontroler tidak seketika kembali ke rentang saturasi. Konsekuensinya kontroler yang menggunakan aksi integral akan mengalami transien yang sangat besar ketika menggunakan aktuator yang memiliki batas saturasi. Ilustrasi integral *windup* ditunjukkan pada Gambar 2.11.

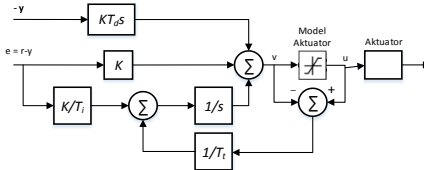


Gambar 2.11 Ilustrasi integral *windup* [8]

2.6.1 Metode *Back-Calculation and Tracking*

Salah satu metode yang digunakan untuk mengatasi *integral windup* adalah *back-calculation and tracking*, cara kerjanya yaitu ketika keluaran saturasi, maka integral diatur ulang agar nilai yang baru tersebut memberika keluaran pada batas saturasi. Integrator tidak di-*reset* secara instan tapi perlahan dengan waktu konstan T_t .

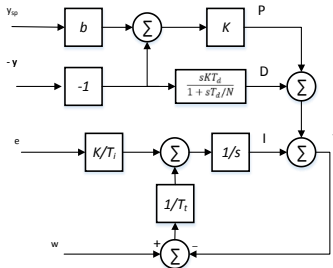
Gambar 2.12 menunjukkan diagram blok kontroler PID dengan *anti-windup* berdasarkan *back-calculation*. Pada sistem tersebut terdapat tambahan umpan balik yang dihasilkan dari perhitungan perbedaan nilai keluaran *control valve* dengan sinyal kontrol yang menghasilkan sinyal *error* (e_s). Sinyal e_s ditambahkan ke integrator dengan *gain* $1/T_t$. Sinyal e_s bernilai nol ketika sinyal kontrol tidak mencapai saturasi. Jadi tidak akan berdampak kepada operasi normal jika aktuator tidak mencapai saturasi. Umpan balik sistem mengalami kerusakan dikarenakan nilai masukan sistem menjadi konstan akibat saturasi. Sebab itulah perlu ditambahkan umpan balik tambahan di sekitar *integrator*, penambahan ini bertujuan agar nilai masukan *integrator* menjadi nol.



Gambar 2.12 Konfigurasi PID *back-calculation and tracking*

2.6.2 Kontroler dengan Mode Tracking

Konfigurasi *cascade* memiliki *outer* dan *inner loop*, karena penggunaan aksi integral pada kedua *loop* tersebut, maka harus dibuat cara untuk menghindari *integral windup*. Menghindari *integral windup* pada *inner loop* dapat dengan menggunakan cara seperti biasa. Namun tidak dengan *outer loop*, ketika sinyal keluaran dari kontroler sekunder terbatas, variabel proses dari kontroler sekunder harus dijadikan sebagai sinyal *tracking* pada kontroler primer. Konfigurasi PID dengan mode *tracking* dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Konfigurasi PID dengan mode *tracking*

2.7 Kontroler PI [8]

Secara luas kontroler PI digunakan pada industri, beberapa alasan diantaranya adalah karena kontroler PI memiliki struktur sederhana, mudah diaplikasikan, dan mudah digunakan. Parameter pada kontroler PI yaitu penguatan proporsional (K_p), waktu integral (τ_i). Algoritma kontroler PI dapat dijelaskan pada Persamaan (2.43).

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2.43)$$

u merupakan sinyal kontrol dan e adalah sinyal kesalahan. Sinyal kontrol merupakan penjumlahan dari 3 aksi yaitu, aksi proporsional P (proporsional terhadap kesalahan), aksi integral I (proporsional terhadap integral dari kesalahan).

2.7.1 Aksi Proporsional

Aksi proporsional memberikan sinyal kontrol yang proporsional terhadap sinyal kesalahan seperti pada Persamaan (2.44). Penggunaan aksi proporsional saja tidak menghilangkan kesalahan keadaan tunak [8].

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.44)$$

Semakin besar K_p maka akan mempercepat dan menyebabkan osilasi pada respon sistem. Transformasi Laplace dengan kondisi awal sama dengan nol memberikan fungsi alih aksi proporsional seperti pada Persamaan (2.45)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.45)$$

2.7.2 Aksi Integral

Fungsi utama aksi integral adalah untuk memastikan bahwa keluaran sistem mencapai nilai *set point* pada keadaan tunak [8]. Sinyal kesalahan positif akan meningkatkan sinyal kontrol, sedangkan sinyal kesalahan negatif akan menyebabkan sinyal kontrol menurun, sekecil apapun kesalahannya. Efek aksi integral akan membuat kesalahan pada keadaan tunak bernilai nol. Kontroler diinterpretasikan dengan aksi

proporsional dan integral. Aksi integral memberikan sinyal kontrol yang proporsional terhadap integral dari nilai kesalahan seperti pada Persamaan (2.46).

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.46)$$

τ_i merupakan waktu integral dan K_i adalah penguatan integral. Semakin besar nilai waktu integral, maka respon sistem akan semakin lambat untuk mencapai *set point*. Nilai waktu integral yang kecil dapat mempercepat dan menyebabkan osilasi pada respon sistem. Transformasi *Laplace* dengan kondisi awal sama dengan nol memberikan fungsi alih aksi integral seperti pada Persamaan (2.47).

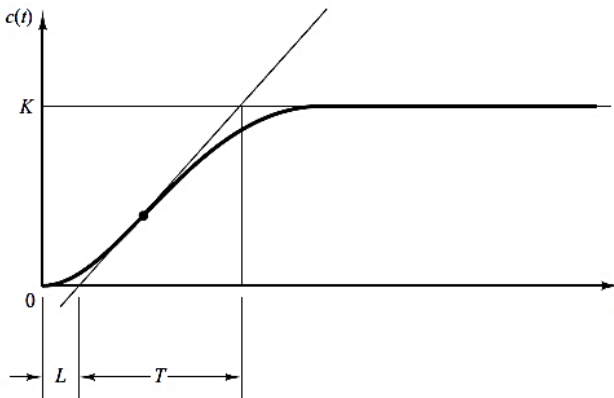
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.47)$$

2.8 Aturan *Tuning* Kontroler PID Ziegler-Nichols [9]

Ziegler-Nichols mengusulkan aturan dalam melakukan penalaan parameter kontroler PID berdasarkan karakteristik respon *step* dari sistem atau berdasarkan nilai K_p yang menghasilkan *marginal stability* ketika hanya menggunakan aksi proporsional. Ziegler-Nichols memiliki dua metode dalam penggunaan aturan penalaannya.

2.8.1 Metode Pertama

Metode ini dilakukan dengan mendapatkan respon sistem terhadap masukan sinyal uji *unit step*. Jika sistem tidak memiliki karakteristik *integrator* atau *pole* dominan *complex-conjugate*, maka akan menghasilkan respon sistem menyerupai kurva huruf S. Respon sistem menyerupai kurva huruf S seperti pada Gambar 2.14, memiliki dua buah karakteristik, yaitu waktu tunda L dan waktu konstan T .



Gambar 2.14 Respon sistem dengan bentuk huruf-S

Nilai waktu tunda dan waktu konstan diperoleh dengan menggambar garis singgung yang menyinggung respon transien paling linier pada kurva S dan menentukan perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu dan garis keluaran pada kondisi tunak. Aturan penalaan kontroler PID berdasarkan metode ini dilakukan dengan mensubstitusikan L dan T ke dalam Tabel 2.2.

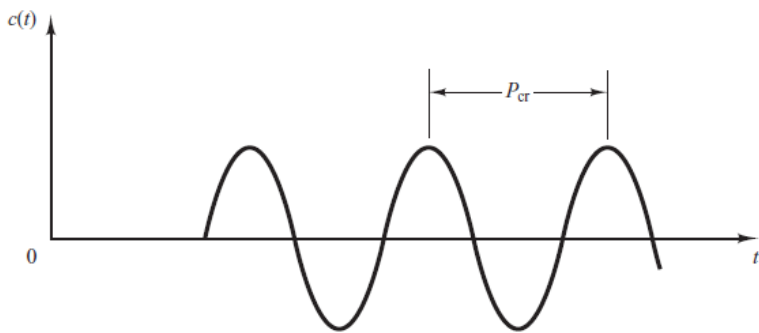
Tabel 2.3 Aturan penalaan kontroler PID Ziegler-Nichols metode pertama

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

2.8.2 Metode Kedua

Langkah pertama untuk melakukan penalaan kontroler PID dengan metode ini yaitu mengatur nilai $\tau_i = \infty$ dan $\tau_d = 0$, dengan hanya menggunakan aksi proporsional saja, tingkatkan nilai parameter K_p mulai dari 0 sampai diperoleh nilai penguatan kritis K_{cr} yaitu ketika respon sistem mengalami osilasi permanen pertama kali. Jika respon sistem tidak mengalami osilasi permanen untuk semua nilai, maka metode ini tidak dapat digunakan. Langkah kedua adalah menentukan periode kritis P_{cr} ,

seperti pada Gambar 2.15, yaitu periode ketika sistem mengalami osilasi permanen pertama kali. Aturan penalaan Ziegler-Nichols metode kedua dapat dilihat pada Tabel 2.4.



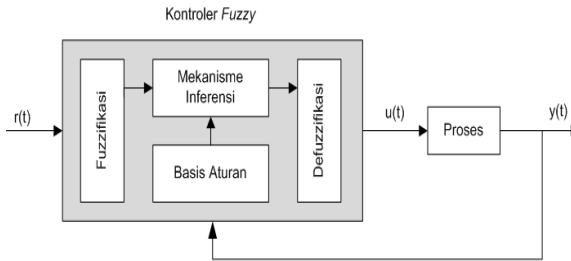
Gambar 2.15 Respon osilasi permanen dengan periode P_{cr}

Tabel 2.4 Aturan penalaan kontroler PID Ziegler-Nichols metode kedua

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

2.9 Kontroler Logika Fuzzy [10] [11]

Fuzzy memiliki arti samar atau kabur. Konsep *fuzzy* meniru cara berfikir manusia dalam merepresentasikan fenomena di alam semesta yang serba samar. Logika manusia memandang atau menilai suatu fenomena di alam semesta ini bukan hanya dengan nilai satu atau nol, benar atau salah, tetapi dengan logika multi nilai yang berangsur-angsur dari nol hingga satu atau bisa disebut dengan derajat keanggotaan. Logika *fuzzy* adalah logika yang memungkinkan nilai antara 0 sampai 1. Logika ini pertama kali dikembangkan oleh Profesor Lotfi A. Zadeh dari Universitas California di Berkeley pada tahun 1965.



Gambar 2.16 Struktur kontroler logika *fuzzy* [10]

Konsep teori himpunan *fuzzy* didasarkan pada pengelompokan elemen-elemen ke dalam kelas-kelas yang mempunyai nilai berdasarkan derajat keanggotaan. Kelompok-kelompok itulah yang disebut himpunan *fuzzy*. Berbeda dengan himpunan tegas (*crisp*) yang menyatakan suatu objek merupakan anggota dari satu himpunan memiliki derajat keanggotaan satu atau nol, benar atau salah. Pada logika *fuzzy* harga kebenaran diberikan dalam terminologi linguistik dengan menyertakan predikat kekaburan (*fuzziness*). Derajat kekaburan pada terminologi linguistik dapat dinyatakan dengan tolok ukur, misalnya agak, cukup, sangat dan sebagainya. Kontroler logika *fuzzy* terdiri dari empat komponen penting yaitu fuzzifikasi, basis aturan, mekanisme inferensi, dan defuzzifikasi. Struktur kontroler logika *fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 2.16.

2.9.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah proses untuk mendapatkan besarnya derajat keanggotaan masukan berupa suatu variabel numerik *non-fuzzy* dengan kata lain mengubah masukan yang berupa himpunan *crisp* menjadi himpunan *fuzzy*. Himpunan *fuzzy* menyatakan nilai *crisp* ke dalam sebuah nilai linguistik dengan derajat keanggotaan $\mu_i^j(x)$. Derajat keanggotaan ini diperoleh dengan memetakan masukan *crisp* x_i ke fungsi keanggotaan tiap-tiap nilai linguistik. Himpunan *fuzzy* dinotasikan dengan:

$$A_i^j = \{(x, \mu_i^j(x)) | x_i \in X_i\} \quad (2.48)$$

dimana i menyatakan variabel linguistik ke- i dan j menyatakan nilai linguistik ke- j .

Fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* berfungsi untuk menyatakan derajat keanggotaan suatu nilai terhadap suatu himpunan yang berkisar antara nilai 0 dan 1. Fungsi keanggotaan memiliki berbagai bentuk diantaranya segitiga, *gaussian*, trapesium, *generalized bell*, dan bentuk-bentuk lainnya.

Persamaan fuzzifikasi untuk metode trapesium ditunjukkan oleh Persamaan (2.49).

$$(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & x > d \end{array} \right\} \quad (2.49)$$

Fuzzifikasi metode segitiga ditunjukkan oleh Persamaan (2.50).

$$f(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{array} \right\} \quad (2.50)$$

2.9.2 Basis Aturan

Pada basis aturan terdapat kaidah dasar yang berisi aturan-aturan secara linguistik berdasarkan pengalaman pakar. Banyak cara untuk membuat aturan berdasarkan pengalaman pakar, cara yang paling umum digunakan adalah dengan format IF-THEN yaitu “*IF premise THEN consequence*”. *Premise* merupakan fakta yang menyatakan kondisi dari nilai masukan. *Consequence* merupakan akibat yang terjadi sesuai dengan fakta. Apabila *premise* lebih dari satu maka dapat digunakan logika “AND” atau “OR”.

Untuk mempermudah penyajian, basis aturan biasanya dinyatakan dalam bentuk tabel yang merepresentasikan hubungan antara *premise* dan *consequence*.

2.9.3 Mekanisme Inferensi

Proses fuzzifikasi dari masing-masing masukan kontroler *fuzzy* menghasilkan himpunan *fuzzy* yang menyatakan derajat keanggotaan

masukannya terhadap setiap nilai linguistik dari variabel linguistiknya. Himpunan *fuzzy* ini akan diolah pada mekanisme inferensi dengan mengacu pada *rule base* yang telah didefinisikan. Pada *rule base* dengan dua *premise*, dibutuhkan operasi himpunan *fuzzy* untuk mendapatkan kesimpulan *fuzzy*. Terdapat beberapa operasi yang dapat dilakukan untuk menentukan kesimpulan *fuzzy*:

1. Interseksi *Fuzzy* (*AND*)

Operasi *AND* melambangkan interseksi dari beberapa himpunan *fuzzy*. Interseksi antara dua buah himpunan *fuzzy* dinotasikan dengan $A_i^j \cap A_i^k$. Terdapat beberapa metode melakukan operasi *AND*, diantaranya:

a. Minimal:

$$\mu_i^j(x) \text{ AND } \mu_i^k(x) = \min\{\mu_i^j(x), \mu_i^k(x)\} \quad (2.51)$$

b. *Algebraic Product*:

$$\mu_i^j(x) \text{ AND } \mu_i^k(x) = \mu_i^j(x) \cdot \mu_i^k(x) \quad (2.52)$$

2. Gabungan *Fuzzy* (*OR*)

Operasi *OR* pada dua buah himpunan *fuzzy* dinyatakan dengan notasi $A_i^j \cup A_i^k$. Terdapat beberapa metode melakukan operasi *OR*, diantaranya:

a. Maksimal:

$$\mu_i^j(x) \text{ OR } \mu_i^k(x) = \max\{\mu_i^j(x), \mu_i^k(x)\} \quad (2.53)$$

b. *Algebraic Sum*:

$$\mu_i^j(x) \text{ OR } \mu_i^k(x) = \mu_i^j(x) + \mu_i^k(x) - \{\mu_i^j(x) \cdot \mu_i^k(x)\} \quad (2.54)$$

Dari tiap-tiap aturan *fuzzy*, akan menghasilkan satu kesimpulan *fuzzy*. Hal ini mengakibatkan dalam tiap proses *fuzzy* akan menghasilkan beberapa kesimpulan *fuzzy*. Oleh karena itu, dari beberapa kesimpulan *fuzzy* tersebut perlu dilakukan proses penggabungan. Proses penggabungan ini disebut dengan proses agregasi. Penggabungan ini akan membentuk sebuah kontroler *fuzzy* yang merepresentasikan semua kesimpulan *fuzzy*.

2.9.4 Defuzzifikasi

Keluaran yang diperoleh dari proses mekanisme inferensi masih berupa himpunan *fuzzy*. Oleh karena itu, perlu dilakukan proses pengolahan kesimpulan *fuzzy* menjadi sebuah nilai *crisp*. Proses pengolahan ini disebut dengan defuzzifikasi. Terdapat beberapa metode yang digunakan dalam proses defuzzifikasi, diantaranya *Center of*

Gravity (COG), *Center of Area (COA)*, dan *Mean of Maximum (MOM)*. Proses defuzzifikasi tersebut menggunakan persamaan:

1. *Center of Gravity (COG)*

$$y_i = \frac{\sum_j b_i \int_y \mu_i^j(y) dy}{\sum_j \int_y \mu_i^j(y) dy} \quad (2.55)$$

dimana:

b_i : titik tengah dari area fungsi keanggotaan

2. *Center of Area (COA)*

$$y_i = \frac{\int_y \mu_i(y) y^p dy}{\int_y \mu_i(y) dy} \quad (2.56)$$

dimana:

y^p : titik puncak dari area fungsi keanggotaan

3. *Mean of Maximum (MOM)*

$$y_i = \frac{\sum_n \max(\mu_i^n) \cdot y_n}{\sum_n \max(\mu_i^n)} \quad (2.57)$$

dimana:

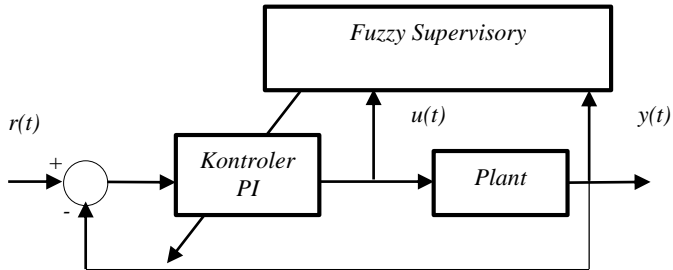
n : jumlah μ_i yang bernilai maksimal ($\max(\mu_i)$)

y_n : titik tengah dari fungsi keanggotaan dengan μ_i

2.10 Kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner

Kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner merupakan kontroler PI dengan penambahan logika fuzzy sebagai supervisor untuk melakukan penalaan terhadap parameter kontroler PI. Sistem fuzzy yang dikenal sebagai sebuah metode yang menggunakan cara berfikir manusia yang mengutamakan variabel linguistik dalam menyelesaikan permasalahan dirasa mampu memperhitungkan nilai parameter PI yang baru ketika

terjadi gangguan pada sistem. Diharapkan kontroler P yang dibangun dengan sistem *fuzzy* menjadi lebih handal dalam menangani sistem dengan gangguan yang tidak terduga. Diagram blok sistem pengaturan dengan kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Diagram Blok Sistem Pengaturan dengan PI-Fuzzy Auto-tuner [10]

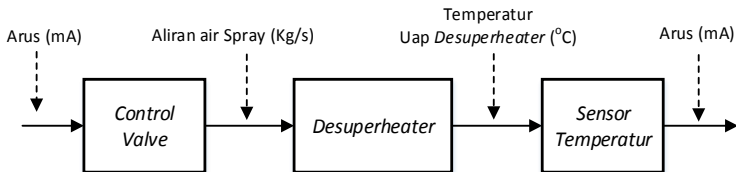
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Bab 3 membahas mengenai pemodelan sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater*, pemodelan sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater*, linearisasi, dan perancangan kontroler PI hingga kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner.

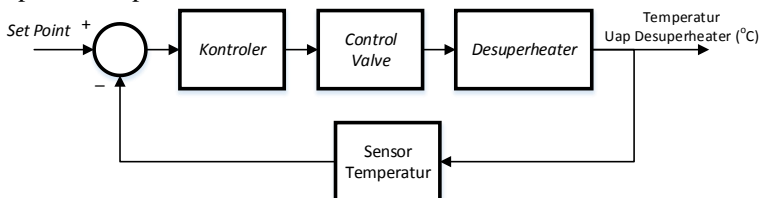
3.1 Pemodelan Sistem Pengaturan Temperatur Uap *Desuperheater*

Diagram blok alur pemodelan dari sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater* ditunjukkan pada Gambar 3.1. Model masing-masing komponen penyusun sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater* telah diperoleh pada bab sebelumnya. Dengan substitusi nilai parameter parameter berdasarkan pada pembangkit listrik berkapasitas 500 MW pada Tabel 3.1, maka diperoleh model untuk masing-masing komponen penyusun sistem pengaturan.



Gambar 3.1 Diagram blok alur pemodelan sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater*

Diagram blok sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater* dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram blok sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater*

Model *control valve* ditunjukkan oleh persamaan (2.31). Masukan berupa arus sebesar 4 – 20 mA dan penggerak berupa pneumatik dengan masukan 3 – 5 psi. Laju aliran maksimal air injeksi adalah 41.667 kg/s. Nilai K_c dan G_c diperoleh pada persamaan (3.1) dan (3.2).

$$K_c = \frac{0 - 41.667}{15 - 3} = -3.4722 \text{ kg/s.psi} \quad (3.1)$$

$$G_c = \frac{15 - 3}{20 - 4} = 0.75 \text{ psi/mA} \quad (3.2)$$

Maka nilai K_v dapat diperoleh

$$K_v = 0.75 \times (-3.4722) = -2.604 \text{ kg/s.mA} \quad (3.3)$$

Fraaksi massa perubahan *control valve* diperoleh dengan menggunakan Persamaan (3.4).

$$\Delta V = \frac{\dot{m}_{\max} - \dot{m}_{\min}}{\dot{m}_{\max}} = \frac{41.667 - 0}{41.667} = 1 \quad (3.4)$$

Control valve tipe diafragma memiliki nilai $Y_c = 0.676$, $C_v = 0.39$, dan $R_v = 0.39$. Dapat dicari nilai T_{cv} .

$$T_v = \frac{0.676}{0.39} = 1.733 \quad (3.5)$$

Substitusi Persamaan (3.3) dan (3.5) kepada (2.31). Maka diperoleh model *control valve*

$$G_v(s) = -\frac{2.604}{2.409s + 1} \quad (3.6)$$

Model *desuperheater* ditunjukkan pada persamaan (2.11), model tersebut bersifat *nonlinear* karena terdapat perkalian antara *state* dengan variabel masukan, yaitu berupa entalpi uap keluaran *desuperheater* $h_d(t)$ dengan pencampuran dua laju massa yang terdiri dari laju uap \dot{m}_{shp} dan laju air injeksi \dot{m}_{spray} , sehingga diperlukan proses linearisasi model. Dengan memasukkan nilai parameter pada Tabel 3.1 dan melakukan linearisasi maka didapatkan hasil model linier seperti yang ditunjukkan

pada Persamaan (3.9). Proses linearisasi model dapat dilihat pada Lampiran 1.

Tabel 3.1 Parameter sistem pengaturan temperatur uap *desupeheater* [1]

Parameter	Nilai	Satuan
C_{ps}	1.94	kJ/kg °C
ρ_s	50.50	kg/m ³
\dot{m}_{shp}	191.667	kg/s
\dot{m}_{spray}	8.329	kg/s
V_d	5.946	m ³
\bar{h}_{shp}	3012.48	kJ/kg
\bar{h}_{spray}	552.16248	kJ/kg
\bar{h}_d	2910	kJ/kg

$$\tau \frac{dh_d}{dt} + h_d(t) = k_1 \dot{m}_{shp}(t) + k_2 \dot{m}_{spray}(t) + k_3 \quad (3.7)$$

dimana,

$$\tau = 1.5014 ; k_1 = 0.5124 ; k_2 = -11.7894 ; k_3 = 2910 \quad (3.8)$$

Maka model linier dari *desuperheater* adalah

$$1.5014 \frac{dh_d}{dt} + h_d(t) = 0.5124 \dot{m}_{shp}(t) - 11.7894 \dot{m}_{spray}(t) + 2910 \quad (3.9)$$

Keluaran dari model linier *desuperheater* masih berupa entalpi, oleh karena itu dilakukan konversi dari entalpi menjadi temperatur. Digunakan regresi linier untuk mengetahui hubungan antara entalpi dan temperatur uap *desuperheater*. Persamaan linier regresi ditunjukkan pada Persamaan (3.10). Proses regresi linier dapat dilihat pada Lampiran 1.

$$T_d = 0.3589 h_d + 705.3406 \quad (3.10)$$

Pemodelan sensor dapat dilihat pada Persamaan (2.30), sensor temperatur yang digunakan adalah sensor termokopel tipe E dengan rentang kerja -200 °C hingga 900 °C dan keluaran 4 mA – 20 mA. Substitusi rentang kerja kepada Persamaan (2.30), maka didapatkan model seperti pada Persamaan (3.11).

$$K_T = \frac{20 - 4}{900 - (-200)} = 0.014545 \text{ mA/C} \quad (3.11)$$

Agar mendapatkan hubungan yang sesuai antara masukan dan keluaran, maka digunakan Persamaan (3.14).

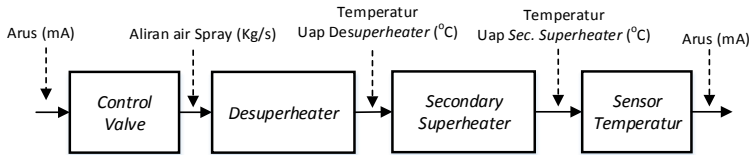
$$T_m(\text{mA}) = \frac{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}}{900^\circ\text{C} - (-200^\circ\text{C})} (T_o + 200^\circ\text{C}) + 4 \text{ mA} \quad (3.12)$$

$$T_m(\text{mA}) = 0.014545 \frac{\text{mA}}{^\circ\text{C}} (T_o + 200^\circ\text{C}) + 4 \text{ mA} \quad (3.13)$$

$$T_m(\text{mA}) = 0.014545 \frac{\text{mA}}{^\circ\text{C}} T_o (^\circ\text{C}) + 6.909 \text{ mA} \quad (3.14)$$

3.2 Pemodelan Sistem Pengaturan Temperatur Uap *Secondary Superheater*

Diagram blok alur pemodelan dari sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater* ditunjukkan pada Gambar 3.1. Model masing-masing komponen penyusun sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater* telah diperoleh pada Bab 2. Model *control valve*, *desuperheater*, dan sensor temperatur sudah diperoleh pada subbab 3.2. Model untuk *secondary superheater* telah didapatkan pada Bab 2. Selanjutnya adalah mensubstitusikan nilai-nilai parameter pada Tabel 3.2 kepada model *secondary superheater* yang telah diperoleh.



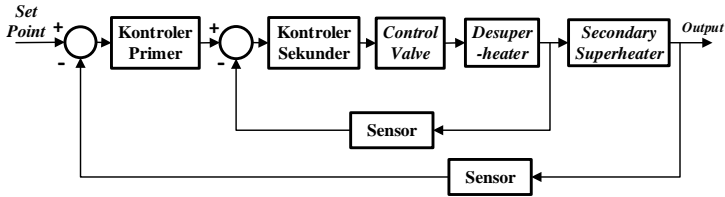
Gambar 3.3 Diagram blok alur pemodelan sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater*

Tabel 3.2 Parameter sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater* [1]

Parameter	Nilai	Satuan
C_p	1.94	kJ/kg °C
ρ_s	50.50	kg/m ³
\bar{m}_d	311.8445	kg/s
V_{shs}	23	m ³
a_i	2210.25	m ²
α_{ms}	3.8565	kJ/(s.m ² .°C)
\bar{T}_d	339.0642	°C
\bar{T}_{shs}	574.873	°C
\bar{T}_g	1359	°C
\bar{T}_m	590.1254	°C
a_o	2454	m ²
α_{gm}	0.068501	kJ/(hr.m ² .°C)
C_m	0.6276	kJ/kg.°C
M_m	252000	kg

Model *secondary superheater* ditunjukkan pada persamaan (2.25), model tersebut bersifat *nonlinear* karena terdapat perkalian antara variabel dengan variabel masukan lain, yaitu berupa laju aliran uap keluaran *desuperheater* $\dot{m}_d(t)$ dengan temperatur keluaran *desuperheater* $T_d(t)$ dan temperatur keluaran *secondary superheater* $T_{shs}(t)$, sehingga diperlukan proses linearisasi model. Dengan memasukkan nilai parameter pada Tabel 3.2 dan melakukan linearisasi maka didapatkan hasil model linier yang ditunjukkan pada Persamaan (3.15). Proses linearisasi model dapat dilihat pada Lampiran 2. Diagram blok sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater* dapat dilihat pada Gambar 3.4.

$$0.2533 \frac{dT_{shs}}{dt} + T_{shs}(t) = -0.0454 \dot{m}_d(t) + 0.0663 T_d(t) + 0.9337 T_m(t) + 14.0839 \quad (3.15)$$



Gambar 3.4 Diagram blok sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater*

3.3 Spesifikasi Respon

Sistem pengaturan temperatur uap *superheater* diharapkan menghilangkan efek gangguan yang disebabkan oleh fluktuasi laju aliran uap dan menjaga temperatur uap *superheater* sedekat mungkin dengan nilai *setpoint* yang ditentukan yaitu 541°C. Spesifikasi performa sistem yang diamati adalah kesalahan kondisi tunak (Ess), *perturbation peak*, *recovery time*, dan RMSE. Ess adalah perbedaan antara *setpoint* yang diinginkan dengan keluaran pada saat kondisi tunak. *Perturbation peak* adalah nilai puncak respon gangguan diukur dari nilai keluaran pada waktu tunak yang diakibatkan oleh perubahan beban. Sedangkan *Recovery time* adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai *setpoint* kembali saat terjadi gangguan. RMSE merupakan spesifikasi yang digunakan untuk melihat nilai kesalahan keluaran respon dibandingkan dengan *setpoint*. Spesifikasi yang ditargetkan untuk dicapai adalah Ess dan *perturbation peak*. Sistem ditargetkan agar tidak memiliki kesalahan kondisi tunak. Maksimum *perturbation peak* sebesar $\pm 10^\circ\text{C}$ [1], sehingga batas atas penyimpangan adalah 551°C dan batas bawah penyimpangan adalah 531°C. Sedangkan *recovery time* dan RMSE adalah spesifikasi lain yang ikut dianalisa juga.

3.4 Kriteria Pembebanan

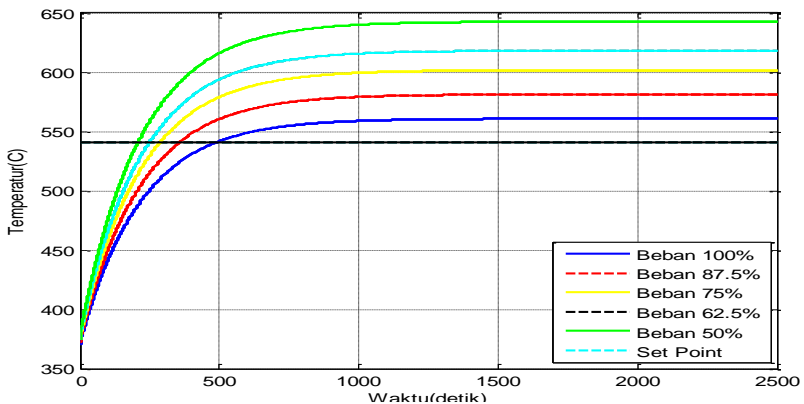
Pembangkit berkapasitas 500 MW ketika membangkitkan beban daya maksimal memiliki laju aliran uap sebesar 415.7927 kg/s [12]. Dalam mengatur temperatur agar tetap pada nilai 541°C, *desuperheater* hanya mampu mengatasi gangguan berupa laju uap pada rentang tertentu karena keluaran air injeksi yang dikeluarkan oleh *control valve* terbatas. Harus dilakukan juga pengaturan posisi pengapian pada *furnace* atau biasa disebut dengan *burner tilting* agar sistem pengaturan bisa menangani seluruh beban laju uap. Dalam penelitian ini tidak dilakukan

pengaturan *burner tilting*, namun diasumsikan posisi pengapian pada posisi maksimal, sehingga temperatur gas buang yang diterima oleh *secondary superheater* adalah maksimal yaitu sekitar 1359°C. Karena terbatasnya rentang aliran uap yang bisa ditangani, maka dipilih lima kriteria pembebanan, yaitu beban minimal, nominal, dan maksimal seperti pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Kriteria beban laju aliran uap

Beban	Daya yang dibangkitkan	Laju aliran uap
100%	500 MW	415.7927 kg/s
87.5%	437.5 MW	363.8186 kg/s
75%	375 MW	311.8445 kg/s
62.5%	312.5 MW	270.2653 kg/s
50%	250 MW	207.8963 kg/s

Dilakukan pemodelan sistem dalam bentuk fungsi alih untuk tiap beban untuk mengetahui dinamika sistem tiap beban. Respon sistem menyerupai sistem orde pertama, maka pemodelan dilakukan dengan menggunakan pendekatan orde pertama. Respon sistem dengan kriteria beban seperti pada Tabel 3.3 dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Respon temperatur uap *secondary superheater*

Dari respon yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 dapat dilakukan pemodelan dengan menggunakan pendekatan orde pertama. Hasil pemodelan dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Hasil pemodelan pada tiap variasi beban

Beban	Model Matematis	RMSE
100%	$G(s) = \frac{0.3452}{221.3s + 1}$	0.6787
87.5%	$G(s) = \frac{0.3831}{219.2s + 1}$	0.3508
75%	$G(s) = \frac{0.4209}{217.5s + 1}$	0.1521
62.5%	$G(s) = \frac{0.4511}{216.3s + 1}$	0.1142
50%	$G(s) = \frac{0.4965}{214s + 1}$	0.3741

3.5 Perancangan Kontroler PI

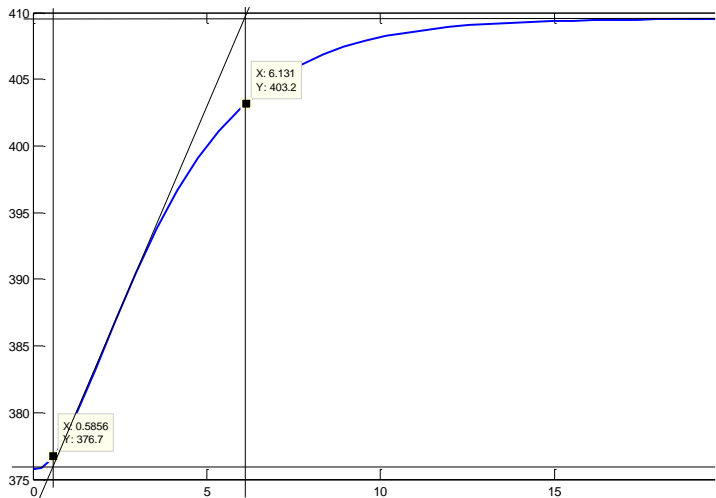
Pada penelitian dirancang dua kontroler yaitu kontroler sekunder untuk sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater* (*inner loop*) dan kontroler primer untuk sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater* (*outer loop*). Kontroler sekunder dan kontroler primer menggunakan kontroler PI.

3.5.1 Sistem Pengaturan Temperatur Uap *Desuperheater*

Perancangan kontroler PI pada sistem pengaturan temperatur uap *desuperheater* menggunakan metode Ziegler Nichols pertama seperti yang telah dibahas pada Bab 2. Metode ini dilakukan dengan mendapatkan respon sistem terhadap masukan sinyal uji *unit step*. Berdasarkan hasil pengujian dengan sinyal uji step, respon *open loop* dari sistem memberikan dua konstanta L dan T yaitu 0.5856 dan 5.5454 secara berturut-turut. Hasil respon sistem *open loop* ditunjukkan pada Gambar 3.6.

Berdasarkan dua konstanta yang diperoleh, yaitu *L* dan *T* maka nilai parameter kontroler P, PI, dan PID dapat diperoleh dengan mensubstitusikan kedua konstanta pada Tabel 2.3. Hasil penalaan parameter kontroler PI menggunakan aturan Ziegler-Nichols metode

pertama dapat dilihat pada Tabel 3.5. Dari hasil penalaan yang telah dilakukan dipilih tipe kontroler PI.



Gambar 3.6 Respon *open loop* temperatur *desuperheater*

Respon temperatur uap *desuperheater* harus lebih cepat daripada respon temperatur uap *secondary superheater*. hal ini karena syarat konfigurasi *cascade* adalah respon *inner loop* harus lebih cepat daripada *outer loop*.

Tabel 3.5 Nilai parameter PI dengan metode Ziegler-Nichols

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	9.4696	∞	0
PI	8.5226	1.952	0

3.5.2 Sistem Pengaturan Temperatur Uap *Secondary Superheater*

Perancangan kontroler PI pada sistem pengaturan temperatur uap *secondary superheater* menggunakan metode analitik. Salah satu spesifikasi temperatur uap *secondary superheater* adalah nilai puncak respon gangguan diukur dari nilai keluaran pada waktu tunak yang diakibatkan oleh perubahan beban maksimum adalah $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Oleh karena itu dirancang kontroler agar spesifikasi respon memiliki maksimal

overshoot sebesar 0.6% dan *settling time* (t_s) sebesar 260 detik. Gambar 3.5 menunjukkan respon *open loop* temperatur *secondary superheater*, respon tersebut menyerupai respon orde satu. Perancangan kontroler dengan metode analitik menggunakan fungsi alih yang telah diperoleh pada Tabel 3.4. Pada model dengan beban 50% dapat diperoleh nilai $K = 0.4209$ dan $\tau = 217.5$ detik. Respon tersebut menyerupai orde satu dan tidak memiliki *overshoot*. Oleh karena itu kontroler yang digunakan adalah PI, tanpa harus menggunakan parameter D yaitu aksi *derivative*. Dengan spesifikasi yang telah ditentukan dapat dicari nilai parameter P dan I.

$$ts^*(\pm 5\%) = \frac{3}{\xi^* \omega_n^*} = 260 \text{ detik} \quad (3.16)$$

$$\omega_n^* = 0.0135$$

dengan nilai ζ dan ω_n , maka dapat dicari parameter K_p dan τ_i

$$M_p^* = 0.06 = \exp \left[- \left(\frac{\xi^*}{\sqrt{1 - \xi^*}} \right) \pi \right] \quad (3.17)$$

$$\ln(0.06) = - \left(\frac{\xi^*}{\sqrt{1 - \xi^*}} \right) \pi \quad (3.18)$$

$$\xi^* = 0.8522$$

$$K_p = \frac{1}{K} (2\xi^* \omega_n^* \tau - 1) \quad (3.19)$$

$$K_p = \frac{1}{0.4209} (2(0.8522)(0.0135)(217.5) - 1) \quad (3.20)$$

$$= 8.3691$$

$$\tau_i = \frac{K.K_p}{\tau.\omega_n^*} = \frac{(0.4209)(8.3691)}{217.5(0.0135)} = 97.5516 \text{ detik} \quad (3.21)$$

Dengan menggunakan cara yang sama dilakukan pada fungsi alih tiap variasi beban, maka didapatkan nilai parameter K_p dan τ_i untuk masing masing pembebanan. Nilai parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Parameter kontroler tiap beban

Beban	Parameter Kontroler	
	K_p	τ_i
100%	16.3342	82.2396
87.5%	12.3893	85.3043
75%	11.1054	91.722
62.5%	9.7713	94.7031
50%	8.3691	97.5516

3.6 Konfigurasi *Anti-Windup* dan *Tracking*

Seperti yang telah dibahas pada Bab 2, dikarenakan *control valve* memiliki batas saturasi. Maka perlu diterapkan kontroler *anti-windup* untuk mengatasi *integral windup*. Diterapkan konfigurasi kontroler *anti-windup* pada *inner loop* untuk membatasi keluaran sinyal kontrol agar sesuai pada rentang kerja *control valve* dan konfigurasi kontroler dengan mode *tracking* pada *outer loop* untuk men-*tracking* proses variable dari *inner loop* yaitu temperatur uap *desuperheater*. Diagram blok sistem pengaturan menggunakan kontroler dengan mode *anti-windup* dan *tracking* dapat dilihat pada Lampiran 8.

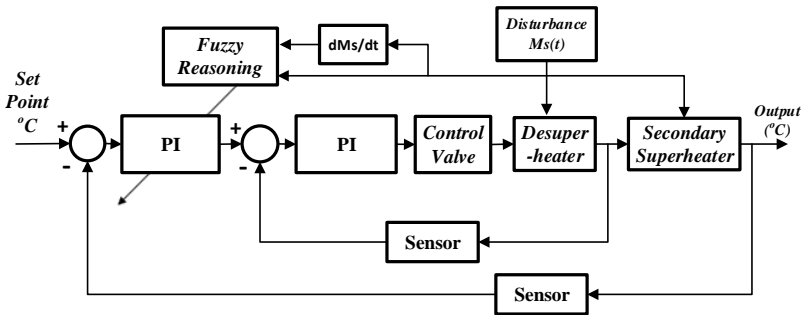
3.7 Perancangan Kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner*

Penerapan kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* diharapkan dapat menangani *disturbance* yang berupa perubahan beban aliran uap yang bervariasi. Oleh karena itu dalam melakukan penalaan parameter PI, logika *fuzzy* sebagai kontrol *supervisory* menggunakan aliran uap dan perubahan aliran uap sebagai masukannya. Kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* diterapkan pada kontroler primer, sehingga logika *fuzzy* bertugas melakukan penalaan parameter kontroler PI. Diagram blok sistem pengaturan dengan menggunakan kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* dapat dilihat pada Gambar 3.7.

Terdapat beberapa tahap dalam perancangan kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner*, antara lain:

1. Pemodelan sistem untuk tiap variasi beban.
2. Menentukan parameter PI untuk tiap variasi beban.

3. Merancang fungsi keanggotaan dari beban, perubahan beban, dan sinyal kontrol berupa parameter K_p , τ_i .
4. Merancang basis aturan.
5. Menguji hasil rancangan kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner yang telah dibuat, jika sinyal kontrol masih belum sesuai dengan yang diharapkan maka dilakukan penalaan kembali pada fungsi keanggotaan fuzzy.

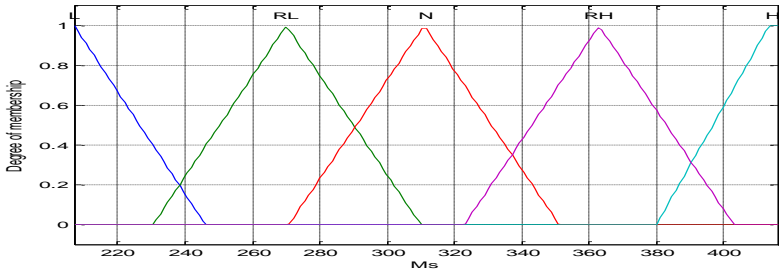


Gambar 3.7 Diagram blok sistem pengaturan temperatur uap *superheater* dengan PI-Fuzzy Auto-tuner

Kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner Auto-tuner dirancang sedemikian hingga agar saat terjadi perubahan parameter *plant* pada saat kondisi tunak, respon temperatur uap *superheater* memiliki *perturbation peak* yang tidak melebihi $\pm 10^\circ\text{C}$ dari *setpoint*. Tahap pertama dan tahap kedua perancangan telah dilakukan pada sub bab 3.5. Selanjutnya, dilakukan tahap perancangan fungsi keanggotaan dari beban, perubahan beban, dan sinyal kontrol K_p dan τ_i . Fungsi keanggotaan aliran uap terdiri dari lima fungsi keanggotaan sesuai dengan variasi beban yang telah dirancang. masing-masing diberi nama *Low* (L), *Relative Low* (RL), *Normal* (N), *Relative High* (RH), *High* (H). Rentang untuk setiap fungsi keanggotaan dapat dilihat pada Gambar 3.8.

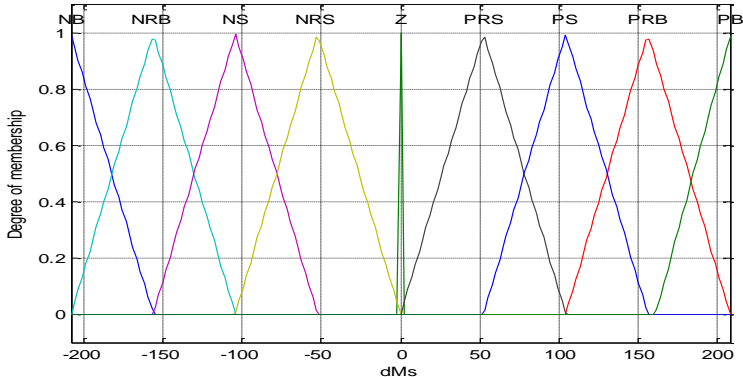
Fungsi keanggotaan perubahan beban (aliran uap) terdiri dari Sembilan fungsi keanggotaan yang masing-masing dinamakan *Negative Big* (NB), *Negative Relative Big* (NRB), *Negative Relative Small* (NRS), *Negative Small* (NS), *Zero* (Z), *Positive Relative Small* (PRS), *Positive Small* (PS), *Positive Relative Big* (PSB), *Positive Big* (PB). Variasi perubahan beban bisa terjadi dari besar ke kecil, atau sebaliknya dari

kecil ke besar. Sehingga dirancang fungsi keanggotaan perubahan beban positif dan negatif, fungsi keanggotaan dapat dilihat pada Gambar 3.9.



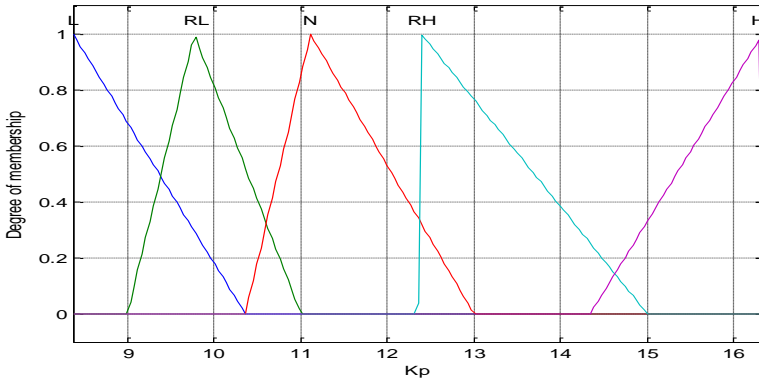
Gambar 3.8 Fungsi keanggotaan aliran uap

Perubahan beban dirancang dalam rentang -207 kg/s hingga 0 dan 0 sampai 207 kg/s. Perubahan ini terjadi pada rentang beban 50% hingga 100%. NB merupakan perubahan beban sekitar -50%, NRB perubahan beban sekitar -37.5%, NS perubahan beban sekitar -25%, NRS perubahan beban sekitar -12.5%, dan Z hampir tidak ada perubahan beban. Begitu pula dengan PB merupakan perubahan beban sekitar 50%, PRB perubahan beban sekitar 37.5%, PS perubahan beban sekitar 25%, PRS perubahan beban sekitar 12.5%.

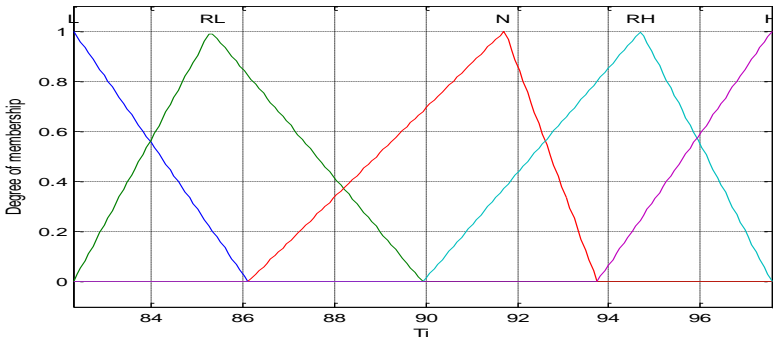


Gambar 3.9 Fungsi keanggotaan perubahan aliran uap

Fungsi keanggotaan keluaran parameter K_p , τ_i dirancang berdasarkan nilai K_p dan τ_i yang telah diperoleh dari perhitungan analitik di subbab sebelumnya. Untuk fungsi keanggotaan τ_d bernilai nol semua karena hanya digunakan K_p dan τ_i . Digunakan lima fungsi keanggotaan yaitu L, RL, N, RH, H. Gambar 3.10 dan Gambar 3.11.



Gambar 3.10 Fungsi keanggotaan parameter K_p



Gambar 3.11 Fungsi keanggotaan parameter τ_i

Langkah selanjutnya adalah merancang basis aturan, dimana basis aturan adalah salah satu pertimbangan dalam pengambilan keputusan. Pada Tabel 3.7 menunjukkan basis aturan parameter K_p . Saat perubahan beban sangat besar maka parameter K_p juga besar, begitu juga sebaliknya.

Dan saat perubahan beban tergolong *zero*, maka parameter sama dengan seperti yang telah dirancang berdasarkan modelnya. Sedangkan pada Tabel 3.8 menunjukkan basis aturan parameter τ_i . Berlawanan dengan parameter K_p , jika perubahan beban besar, maka nilai parameter τ_i kecil.

Tabel 3.7 Basis aturan parameter K_p

K_p		Ms				
		L	RL	N	RH	H
delta Ms	NB	H	H	H	H	H
	NRB	RH	RH	RH	RH	RH
	NS	N	N	N	N	N
	NRS	RL	RL	RL	RL	RL
	Z	H	RL	N	RH	H
	PRS	RL	RL	RL	RL	RL
	PS	N	N	N	N	N
	PRB	RH	RH	RH	RH	RH
	PB	H	H	H	H	H

Tahap selanjutnya adalah menentukan metode defuzzifikasi yang digunakan. Pada perancangan sistem *fuzzy* ini, digunakan metode *Center Of Area* untuk defuzzifikasinya seperti pada Persamaan (2. 56).

Tabel 3.8 Basis aturan parameter τ_i

τ_i		Ms				
		L	RL	N	RH	H
delta Ms	NB	L	L	L	L	L
	NRB	RL	RL	RL	RL	RL
	NS	N	N	N	N	N
	NRS	RH	RH	RH	RH	RH
	Z	L	RH	N	RL	L
	PRS	RH	RH	RH	RH	RH
	PS	N	N	N	N	N
	PRB	RL	RL	RL	RL	RL
	PB	L	L	L	L	L

3.8 Perancangan Simulasi

Pengujian rancangan kontroler dilakukan dengan simulasi menggunakan perangkat simulasi MATLAB Simulink dan LabVIEW. Simulasi bertujuan untuk mengetahui karakteristik kontroler yang telah dirancang dan kemampuan untuk mempertahankan respon terhadap gangguan. Setiap model yang telah diperoleh pada subbab sebelumnya disimulasikan menggunakan MATLAB Simulink. Model *desuperheater*, *secondary superheater*, dan temperatur metal yang telah dibuat menggunakan diagram Simulink dapat dilihat pada Lampiran 3, Lampiran 4, dan Lampiran 5. Sedangkan Simulasi keseluruhan rancangan sistem dengan menggunakan kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner dapat dilihat pada Lampiran 6.

Dirancang juga simulasi menggunakan *software* LabVIEW. Pada LabVIEW dirancang *virtual plant* dan *Human Machine Interface* (HMI) dari sistem pengaturan temperatur uap *superheater*. *virtual plant* merupakan perangkat lunak yang berisi model matematis dan algoritma kontrol suatu sistem. Perangkat lunak tersebut dilengkapi dengan fasilitas untuk mengubah masukan sistem atau parameter kontroler. Simulasi *virtual plant* dapat dilihat pada Lampiran 7. Sedangkan HMI merupakan sebuah interface atau tampilan penghubung antara manusia dengan mesin. HMI berfungsi memonitor keadaan yang ada pada *plant*, mengatur nilai parameter pada *plant*, mengambil tindakan sesuai keadaan yang terjadi, memunculkan tanda peringatan dengan menggunakan alarm jika terjadi sesuatu yang tidak normal, dan menampilkan pola data kejadian yang ada pada *plant*, Rancangan HMI dapat dilihat pada Lampiran 9.

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS METODE PI-FUZZY AUTO-TUNER

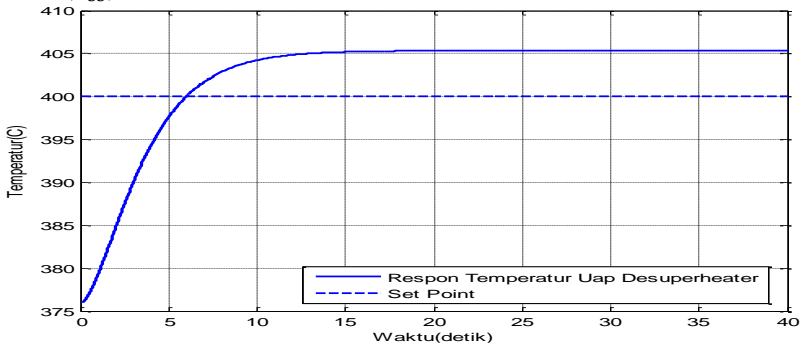
Dilakukan pengujian sistem yang telah dirancang pada Bab 3 untuk mengetahui performa sistemnya. Pengujian dilakukan dengan memberikan gangguan berupa beban yang bervariasi. Dengan adanya beban yang berubah-ubah, dianalisa perubahan parameter kontroler PI hasil penalaan oleh logika *fuzzy*. Selain itu, dibandingkan performa sistem antara menggunakan kontroler PI konvensional dan menggunakan PI-Fuzzy Auto-tuner.

4.1 Pengujian Sistem Secara *Open Loop*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon ketika tidak memiliki umpan balik dan tanpa kontroler. Karena sistem menggunakan konfigurasi *cascade* maka yang dianalisa adalah sistem pengaturan *inner loop* dan *outer loop*.

4.4.1. Sistem Pengaturan Temperatur Uap *Desuperheater Open Loop*

Pada pengujian sistem secara *open loop* berfungsi untuk mengetahui respon temperatur uap *desuperheater* apabila tanpa umpan balik dan kontroler. Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa respon temperatur uap *desuperheater* tidak memiliki *overshoot*, dan memiliki kesalahan waktu tunak (E_{ss}) sebesar -5°C .



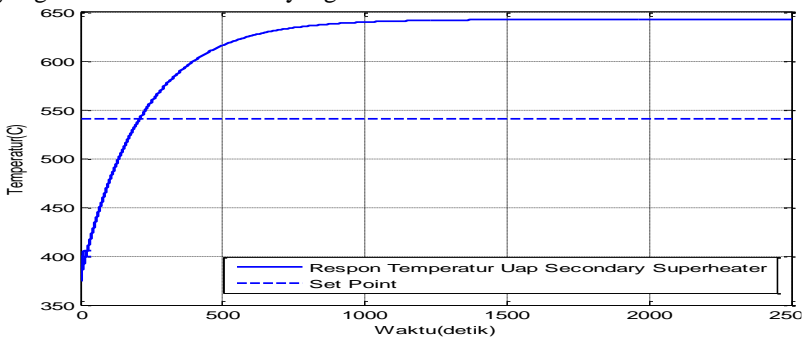
Gambar 4.1 Respon *open loop* temperatur uap *desuperheater*

Sistem pengaturan *desuperheater* merupakan sistem pengaturan *inner loop* pada konfigurasi *cascade*, oleh karena itu respon sistem nya harus memiliki respon minimal tiga kali lebih cepat dari pada *outer loop*. Kecepatan respon dapat dilihat melalui konstanta waktu (τ) dan waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai keadaan tunak, *settling time* (t_s). Pada respon sistem mencapai keadaan tunak pada detik ke 9.213 dan memiliki konstanta waktu (τ) sebesar 3.88 detik. Respon *desuperheater* sangat cepat karena volume *desuperheater* hanya sebesar 5.946 m³.

4.4.2. Sistem Pengaturan Temperatur Uap *Secondary Superheater Open Loop*

Nilai temperatur yang sangat besar melebihi *setpoint* yang ditentukan dapat berakibat sangat berbahaya, bisa terjadi *overheating* pada pipa-pipa *boiler*, oleh karena itu dibutuhkan sistem pengaturan agar temperatur tetap di sekitar *setpoint*. Dapat dilihat pada Gambar 4.2 respon temperatur uap *secondary superheater* memiliki kesalahan waktu tunak sebesar -101 °C dengan nilai tunak sebesar 642.6 °C.

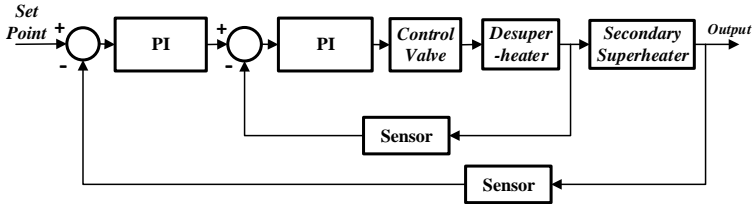
Konstanta waktu sistem (τ) adalah 213.5 detik, dan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai keadaan tunak adalah 651.7 detik. Jika dibandingkan dengan respon temperatur uap *desuperheater*, respon temperatur uap *secondary superheater* lebih lambat. Sehingga syarat konfigurasi *cascade* terpenuhi. Respon temperatur uap *superheater* sangat lama karena pada *secondary superheater* terdapat proses pemanasan secara konveksi dari dinding pipa *superheater* terhadap uap yang membutuhkan waktu yang lama.



Gambar 4.2 Respon temperatur uap *secondary superheater*

4.2 Pengujian Kontroler PI

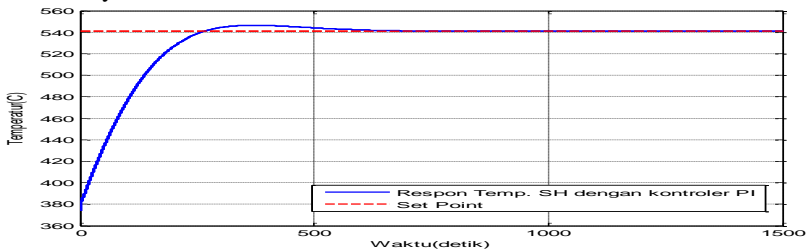
Pada pengujian ini, kontroler pada *outer loop* adalah kontroler PI dengan parameter kontroler K_p dan τ_i tetap. Diagram blok sistem pengaturan dapat dilihat pada Gambar 4.3. Sistem diuji dengan memberikan beban berupa parameter *plant* yaitu laju uap yang tetap dan berubah. Dengan kriteria beban yang telah disebutkan pada bab sebelumnya.



Gambar 4.3 Diagram blok sistem pengaturan dengan kontroler PI konvensional

4.2.1 Pengujian Kontroler PI dengan Parameter *Plant* Tetap

Pada pengujian ini beban berupa laju uap yang diberikan adalah tetap/konstan yaitu sebesar 207.896 kg/s. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.4. Respon sistem memiliki maksimum *overshoot* sebesar 3.2%, tidak memiliki kesalahan kondisi tunak (E_{ss}). Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan tunak $t_s(\pm 5\%)$ adalah 221.5 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa, pada suatu sistem yang menggunakan kontroler PI dengan parameter kontroler tetap dan sistem tidak mengalami perubahan parameter *plant*, maka sistem tersebut berjalan dengan baik. Temperatur uap *superheater* bisa mencapai set *point* dengan baik dan tidak terdapat nilai temperatur yang membahayakan sistem.

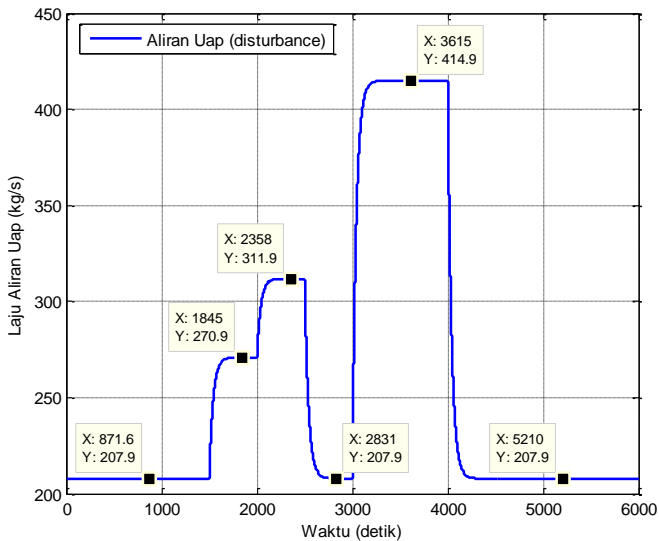


Gambar 4.4 Pengujian kontroler PI dengan parameter *plant* tetap

4.2.2 Pengujian Kontroler PI dengan Perubahan Parameter *Plant*

Pada pengujian ini dilakukan menggunakan kontroler PI dengan parameter kontroler K_p dan τ_i tetap, namun beban berupa laju uap berubah. Respon perubahan laju aliran uap dapat dilihat pada Gambar 4.5. Terdapat perubahan laju uap bertambah dan berkurang. Perubahan laju beban dapat dilihat pada Gambar 4.5. Pada detik ke 1500, beban mengalami perubahan laju uap dari 207 kg/s dari 270 kg/s. Pada detik ke 2000 beban mengalami perubahan laju uap dari 270 kg/s menjadi 311 kg/s. Pada detik ke 2500 beban mengalami perubahan laju uap dari 311 kg/s menjadi 207 kg/s. Pada detik ke 3000 beban mengalami perubahan laju uap sebesar 207 kg/s menjadi 415 kg/s. Dan pada detik ke 4000 beban mengalami perubahan laju uap dari 311 kg/s menjadi 207 kg/s.

Pada saat laju uap naik, maka pemanasan terhadap uap tidak merata, sehingga menyebabkan temperatur uap menurun. Sebaliknya, jika laju uap turun maka pemanasan terhadap uap menjadi tinggi, sehingga menyebabkan temperatur uap meningkat. Penurunan dan peningkatan temperatur uap dapat dilihat pada Gambar 4.6.



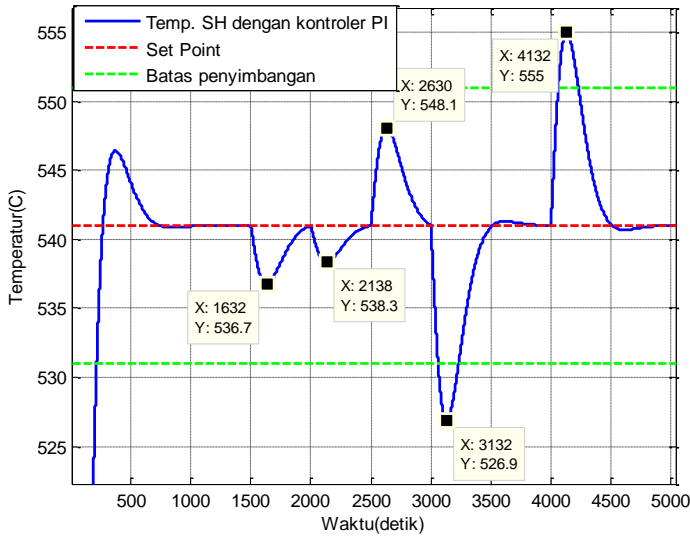
Gambar 4.5 Perubahan aliran uap sebagai gangguan sistem

Dapat diamati hasil pengujian menggunakan kontroler PI dengan perubahan beban pada Gambar 4.6. Spesifikasi hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pada perubahan beban terbesar yaitu 415.79 kg/s ke 207.89 kg/s, *recovery time* yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke *setpoint* saat terjadi gangguan adalah 500. *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk hasil pengujian keseluruhan adalah sebesar 16.2794. Perubahan laju uap maksimum yaitu dari 207.896 kg/s menjadi 415.792 kg/s menyebabkan penurunan temperatur uap *perturbation peak* sebesar 14.1°C dengan nilai temperatur uap *superheater* sebesar 555°C. Dan perubahan uap maksimum dari 415.792 kg/s menjadi 207.896 kg/s menyebabkan temperatur uap *superheater* mengalami peningkatan *perturbation peak* sebesar 14°C dengan nilai temperatur uap *superheater* sebesar 526.9 °C. Kedua perubahan maksimum ini menyebabkan penyimpangan temperatur uap melebihi batas toleransi yaitu 551°C dan 531°C sebagai batas atas dan batas bawah, hal ini dapat membahayakan sistem.

Tabel 4.1 Spesifikasi respon sistem menggunakan kontroler PI dengan parameter *plant*

Beban (kg/s)	<i>Perturbation peak</i> (°C)	<i>Recovery Time</i> (detik)
207.89 ke 270.26	4.3	508
270.26 ke 311.84	2.7	490
311.84 ke 207.89	7.1	506
207.89 ke 415.79	14.1	529
415.79 ke 207.89	14	500

Kontroler PI dengan parameter kontroler tetap masih belum dapat mengatasi *perturbation peak* yang melebihi batas penyimpangan yang ditentukan, yaitu batas atas adalah 551°C dan batas bawah adalah 531°C. Hal ini dikarenakan parameter kontroler PI tidak menyesuaikan dengan perubahan sistem. Saat terjadi perubahan parameter pada sistem, dinamika sistem juga akan berubah. Maka parameter kontroler PI harus dilakukan penalaan ulang agar dapat mengatasi gangguan yang terjadi.



Gambar 4.6 Pengujian kontroler PI dengan parameter *plant* berubah

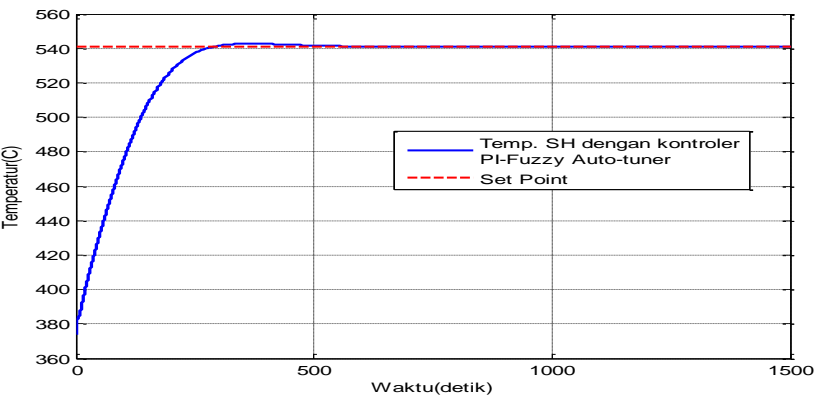
4.3 Pengujian Kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner

Pengujian ini dilakukan untuk melihat hasil rancangan PI-Fuzzy Auto-tuner yang telah dirancang pada Bab 3 jika diterapkan pada sistem. Kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner digunakan pada *outer loop* untuk mengatur temperatur uap *secondary superheater*. Diagram blok sistem pengaturan dengan menggunakan kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner dapat dilihat pada Gambar 3.7. Pada pengujian ini dianalisa juga respon perubahan nilai parameter kontroler K_p dan τ_i untuk menunjukkan proses adaptasi dari kontroler terhadap perubahan parameter *plant*. Pengujian dilakukan dengan dua kondisi, yaitu parameter *plant* tetap dan parameter *plant* berubah.

4.3.1 Pengujian Kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner dengan Parameter *Plant* Tetap

Gambar 4.7 menunjukkan hasil pengujian sistem PI-Fuzzy Auto-tuner dengan parameter *plant* berupa laju uap yang tetap yaitu sebesar 207.896 kg/s. Respon hasil pengujian memiliki *overshoot* sebesar 1% dan tidak memiliki kesalahan tunak. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai

keadaan tunak $t_s(\pm 5\%)$ adalah 223.6 detik. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem jika menggunakan kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* dengan sistem tidak mengalami perubahan parameter *plant*, maka sistem berjalan dengan baik. *Overshoot* yang ditimbulkan lebih kecil daripada dengan menggunakan PI konvensional.



Gambar 4.7 Pengujian kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* dengan parameter *plant* tetap

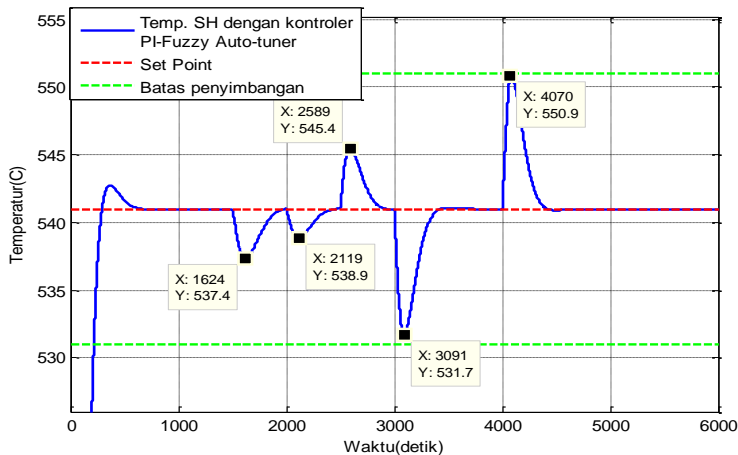
4.3.2 Pengujian Kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* dengan Perubahan Parameter *Plant*

Melalui Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa temperatur uap *superheater* saat terdapat gangguan berupa perubahan laju uap, temperatur dapat kembali kepada *setpoint*. Dapat diamati hasil pengujian yang dapat dilihat pada Gambar 4.8. Spesifikasi *perturbation peak* dan *recovery time* hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Spesifikasi respon sistem menggunakan kontroler *PI-Fuzzy Auto-tuner* dengan parameter *plant*

Beban (kg/s)	<i>Perturbation peak</i> (°C)	<i>Recovery Time</i> (detik)
207.89 ke 270.26	3.6	498
270.26 ke 311.84	2.1	502
311.84 ke 207.89	4.4	494
207.89 ke 415.79	9.3	434
415.79 ke 207.89	9.9	423

Dilihat pada Tabel 4.2, perubahan beban terbesar yaitu 415.79 kg/s menjadi 207.89 kg/s, *Recovery time* yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke *setpoint* adalah 423 detik. *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk hasil pengujian keseluruhan adalah sebesar 16.0508. Pada perubahan laju uap maksimum yaitu dari 207.896 kg/s menjadi 415.792 kg/s menyebabkan penurunan temperatur uap *perturbation peak* sebesar 9.3°C dengan nilai temperatur uap sebesar 531.7°C. Sedangkan perubahan uap maksimum dari 415.792 kg/s menjadi 207.896 kg/s menyebabkan temperatur uap *superheater* mengalami kenaikan dengan *perturbation peak* sebesar 9.9°C dengan 550.9°C.

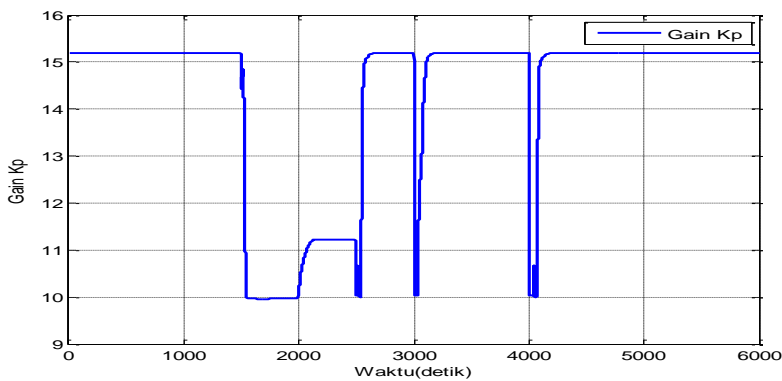


Gambar 4.8 Respon temperatur uap *superheater* dengan perubahan beban

Kontroler PI-Fuzzy *Auto-tuner* dapat mengatasi *perturbation peak* agar tidak melebihi batas penyimpangan yang ditentukan yaitu 551°C sebagai batas atas dan 531°C sebagai batas bawah. Hal ini dikarenakan parameter kontroler PI-Fuzzy *Auto-tuner* menyesuaikan dengan perubahan parameter *plant* saat terjadi perubahan parameter pada sistem.

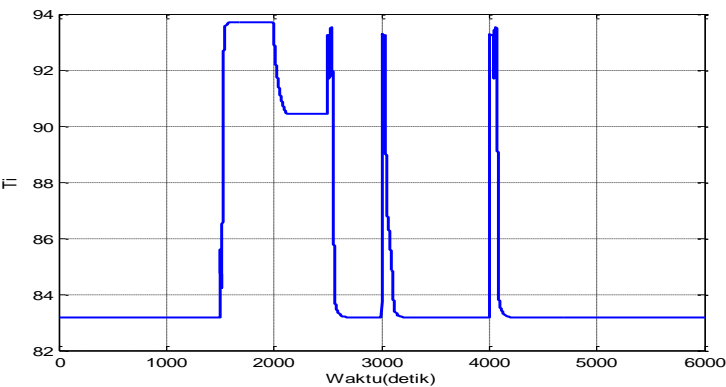
Dari perubahan parameter hasil penalaan yang dilakukan oleh logika *fuzzy* yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, dapat dilihat bahwa saat terjadi perubahan beban bernilai negatif, parameter K_p berkurang, parameter τ_i bertambah. Sebaliknya jika saat terjadi

perubahan beban bernilai positif, maka parameter K_p bertambah, parameter τ_i berkurang.



Gambar 4.9 Perubahan parameter K_p

Berbeda dengan saat terjadi perubahan beban terbesar yang berharga positif pada detik ke 3000, temperatur uap dapat kembali ke *setpoint* dengan cepat dan memiliki *perturbation peak* tidak melebihi batas maksimum.



Gambar 4.10 Perubahan parameter τ_i

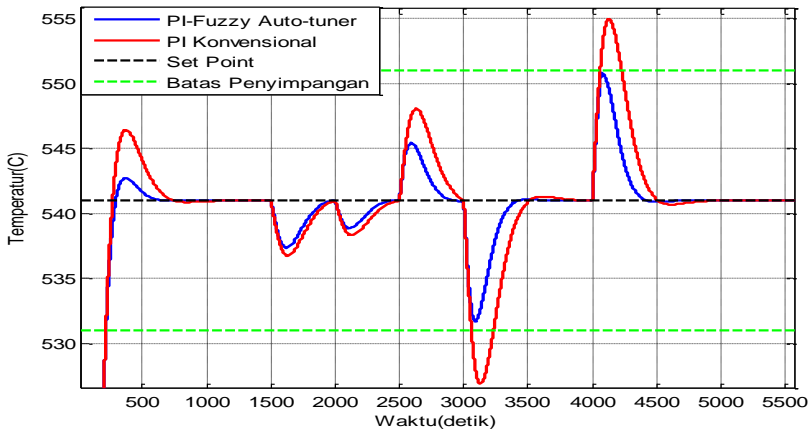
4.3.3 Perbandingan PI Konvensional dan PI-Fuzzy Auto-tuner

Perbandingan Penggunaan PI Konvensional dan PI-Fuzzy Auto-tuner pada sistem pengaturan temperatur uap *superheater* dapat dilihat pada Gambar 4.11. Perbandingan spesifikasi yang dihasilkan juga dapat dilihat pula pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan kontroler PI dan PI-Fuzzy Auto-tuner

Kontroler	RMSE	<i>Perturbation peak (maks)</i>	<i>Recovery Time terkecil</i>
PI Konvensional	16.279	14.1°C	490
PI-Fuzzy Auto-tuner	16.05	9.9°C	423

Dari Tabel 4.3 menunjukkan PI-Fuzzy Auto-tuner menghasilkan RMSE, *perturbation peak*, dan *recovery time* yang lebih kecil dari pada PI konvensional. Pada Gambar 4.11 juga dapat dilihat bahwa PI-Fuzzy Auto-tuner memberikan performa yang lebih baik dari pada PI konvensional, saat beban mengalami perubahan terbesar, PI konvensional tidak bisa mengatasi agar temperatur tidak melebihi batas maksimum penyimpangan. Berbeda dengan PI-Fuzzy Auto-tuner yang dapat melakukan penalaan parameter PI secara otomatis dengan logika *fuzzy*. *Perturbation peak* yang dihasilkan lebih kecil. Begitu pula dengan *recovery time* dengan menggunakan PI-Fuzzy Auto-tuner lebih cepat.



Gambar 4.11 Respon perbandingan kontroler PI konvensional dan PI-Fuzzy Auto-tuner

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis dapat diperoleh kesimpulan bahwa kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner:

- Mampu menjaga temperatur uap *superheater* pada *setpoint* ketika terdapat gangguan atau $E_{ss} = 0$.
- Menggunakan masukan berupa laju aliran uap dan perubahan laju aliran uap mampu mengatasi gangguan pada temperatur uap *superheater*.
- Mampu meredam *perturbation peak* sehingga tidak melebihi ± 10 °C dari *setpoint*. Maksimal *perturbation peak* terbesar adalah 9.9°C.
- Lebih baik daripada PI konvensional pada spesifikasi *recovery time*, *perturbation peak*, dan RMSE karena PI-Fuzzy Auto-tuner dapat menyesuaikan perubahan parameter *plant* dengan melakukan penalaan parameter kontroler PI.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Valsalam, S. Rominus; Anish S; B. Raja Singh, "Boiler Modelling and Optimal Control of Steam Temperature in Power Plants," *IFAC International Symposium on Power Plants and Power Systems Control*, pp. 125-130, 2009.
- [2] G. Gilman, Boiler Control Systems Engineering 2nd Edition, United States of America: International Society of Automation, 2010.
- [3] Tian Haijun, Wang Jingru, "Modelling of Power Plant Superheated Steam Temperature Based on Least Squares Support Vector Machines," *Energy Procedia* 17, pp. 61-67, 2012.
- [4] Makovicka, J., Havlena, V., dan Benes, M., "Mathematical Modelling of Steam and Flue Gas Flow in A Heat Exchanger of Steam Boiler," *Proceeding of ALGORITMY*, pp. 171-178, 2002.
- [5] Y. A. Cengel, Heat Transfer A Practical Approach, New York: McGraw-Hill, 2008.
- [6] Haryanto, Ade, Turnip Arjon, Keum-Shik Hong, "Parameter Identification of a Superheater Boiler System Based on Wiener-Hammerstein Model Using Maximum Likelihood Method," *Asian Control Conference*, 2009.
- [7] Soliman, Samir S., Srinath, Mandyam D., Continuous and Discrete and Signals and System, New Jersey: Prentice-Hall, 1998.
- [8] K. J. Astrom and T. Hagglund, Advanced PID Control, United States of America: Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- [9] K. Ogata, Modern Control Engineering, 4th ed., Prentice Hall, 2002.
- [10] Passino, Kevin M.; Yurkovich, Stephen, Fuzzy Control, California: Addison Wesley Longman, 199.
- [11] Yan, J., Ryan, M., Power, J., Using Fuzzy Logic, UK: Prentice Hall International, 1994.
- [12] ZHENG Qinling, GAO Zhiqiang, TAN Wen, "Disturbance Rejection in Thermal Power Plants," *30th Chinese Control Conference*, 2011.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Lampiran 1. Linearisasi Model *Desuperheater*

Persamaan nonlinear *desuperheater* ditunjukkan pada persamaan (L1.1)

$$\frac{dh_d(t)}{dt} = \frac{1}{V_d \rho_s} [\dot{m}_{shp}(t).h_{shp} + \dot{m}_{spray}(t).h_{spray} - (\dot{m}_{shp}(t) + \dot{m}_{spray}(t)) h_d(t)] \quad (L1.1)$$

Model nonlinear didekati menggunakan deret Taylor, pendekatan dilakukan di sekitar nilai *steady-state* (\bar{x})

$$\frac{dh_d(t)}{dt} = f(\bar{h}_d, \bar{\dot{m}}_{shp}, \bar{\dot{m}}_{spray}) \quad (L1.2)$$

Fungsi $f(\bar{h}_d, \bar{\dot{m}}_{shp}, \bar{\dot{m}}_{spray})$ dapat didekati dengan menggunakan pendekatan deret Taylor di sekitar titik *steady-state* (\bar{x})

$$\begin{aligned} \frac{dh_d}{dt} = & f(\bar{h}_d, \bar{\dot{m}}_{shp}, \bar{\dot{m}}_{spray}) + \left. \frac{\partial f}{\partial h_d} \right|_{\bar{h}_d, \bar{\dot{m}}_{shp}, \bar{\dot{m}}_{spray}} (h_d(t) - \bar{h}_d) + \\ & \left. \frac{\partial f}{\partial \dot{m}_{shp}} \right|_{\bar{h}_d, \bar{\dot{m}}_{shp}, \bar{\dot{m}}_{spray}} (\dot{m}_{shp}(t) - \bar{\dot{m}}_{shp}) + \\ & \left. \frac{\partial f}{\partial \dot{m}_w} \right|_{\bar{h}_d, \bar{\dot{m}}_{shp}, \bar{\dot{m}}_{spray}} (\dot{m}_{spray}(t) - \bar{\dot{m}}_{spray}) \end{aligned} \quad (L1.3)$$

$$\frac{d\bar{h}_d}{dt} = f(\bar{h}_d, \bar{\dot{m}}_{shp}, \bar{\dot{m}}_{spray}) = 0 \quad (L1.4)$$

Dengan

$$\left. \frac{\partial f}{\partial h_d} \right|_{\bar{h}_d, \bar{m}_{shp}, \bar{m}_{spray}} = - \left(\frac{\bar{m}_{shp} + \bar{m}_{spray}}{V_d \rho_s} \right); \quad \left. \frac{\partial f}{\partial \dot{m}_{shp}} \right|_{\bar{h}_d, \bar{m}_{shp}, \bar{m}_{spray}} = \left(\frac{\bar{h}_{shp} - \bar{h}_d}{V_d \rho_s} \right)$$

$$; \quad \left. \frac{\partial f}{\partial \dot{m}_{shp}} \right|_{\bar{h}_d, \bar{m}_{shp}, \bar{m}_{spray}} = \left(\frac{\bar{h}_{spray} - \bar{h}_d}{V_d \rho_s} \right)$$

Pada $\bar{m}_{shp}, \bar{h}_{shp}, \bar{m}_{spray}, \bar{h}_{spray}$ dan \bar{h}_d merupakan nilai proses dalam keadaan *steady* dengan asumsi kondisi temperatur dan tekanan konstan, maka persamaan (L1.1) menjadi (L1.5)

$$\begin{aligned} \frac{dh_d}{dt} = & - \left(\frac{\bar{m}_{shp} + \bar{m}_{spray}}{V_d \rho_s} \right) (h_d(t) - \bar{h}_d) + \\ & \left(\frac{\bar{h}_{shp} - \bar{h}_d}{V_d \rho_s} \right) (\dot{m}_{shp}(t) - \bar{m}_{shp}) + \\ & \left(\frac{\bar{h}_{spray} - \bar{h}_d}{V_d \rho_s} \right) (\dot{m}_{spray}(t) - \bar{m}_{spray}) \end{aligned} \quad (L1.5)$$

Jika Persamaan (L1.5) disederhanakan maka menjadi

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_d \rho_s}{\bar{m}_{shp} + \bar{m}_{spray}} \right) \frac{dh_d}{dt} + h_d(t) = & \left(\frac{\bar{h}_{shp} - \bar{h}_d}{\bar{m}_{shp} + \bar{m}_{spray}} \right) \dot{m}_{shp}(t) - \\ & \left(\frac{\bar{h}_{shp} - \bar{h}_d}{\bar{m}_{shp} + \bar{m}_{spray}} \right) \bar{m}_{shp} + \\ & \left(\frac{\bar{h}_{spray} - \bar{h}_d}{\bar{m}_{shp} + \bar{m}_{spray}} \right) \dot{m}_{spray}(t) - \\ & \left(\frac{\bar{h}_{spray} - \bar{h}_d}{\bar{m}_{shp} + \bar{m}_{spray}} \right) \bar{m}_{spray} + \bar{h}_d \end{aligned} \quad (L1.6)$$

dengan

$$\tau = \frac{V_d \rho_s}{\dot{m}_{shp} + \dot{m}_{spray}}; k_1 = \left(\frac{\bar{h}_{shp} - \bar{h}_d}{\dot{m}_{shp} + \dot{m}_{spray}} \right); k_2 = \left(\frac{\bar{h}_{spray} - \bar{h}_d}{\dot{m}_{shp} + \dot{m}_{spray}} \right);$$

$$k_3 = \left(\bar{h}_d - \left(\frac{\bar{h}_{shp} - \bar{h}_d}{\dot{m}_{shp} + \dot{m}_{spray}} \right) \dot{m}_{shp} - \left(\frac{\bar{h}_{spray} - \bar{h}_d}{\dot{m}_{shp} + \dot{m}_{spray}} \right) \dot{m}_{spray} \right)$$

Maka,

$$\tau \frac{dh_d}{dt} + h_d(t) = k_1 \dot{m}_{shp}(t) + k_2 \dot{m}_{spray}(t) + k_3 \quad (L1.7)$$

$$\tau = 1.5014; k_1 = 0.5124; k_2 = -11.7894; k_3 = 2910$$

$$1.5014 \frac{dh_d}{dt} + h_d(t) = 0.5124 \dot{m}_{shp}(t) - 11.7894 \dot{m}_{spray}(t) + 2910$$

Metode Regresi linear untuk memperoleh nilai temperatur uap dari entalpi uap

$$\begin{bmatrix} n & \sum h_{di} \\ \sum h_{di} & \sum h_{di}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum T_{di} \\ \sum h_{di} T_{di} \end{bmatrix} \quad (L1.8)$$

$$\begin{bmatrix} 10 & 33104.4 \\ 3310.4 & 110948628.8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4828.15 \\ 16470882 \end{bmatrix} \quad (L1.9)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3589 \\ -705.3406 \end{bmatrix} \quad (L1.10)$$

$$T_d = ah_d + b \quad (L1.11)$$

$$T_d = 0.3589 h_d - 705.3406 \quad (L1.12)$$

Lampiran 2. Linearisasi Model *Secondary Superheater*

Model nonlinear diketahui seperti pada Persamaan (L2.1)

$$V_{shs} \rho_s C_p \frac{dT_{shs}(t)}{dt} = \dot{m}_d(t) C_p (T_d(t) - T_{shs}(t)) + a_i \alpha_{ms} (T_m(t) - T_{shs}(t)) \quad (L2.1)$$

$$\frac{dT_{shs}(t)}{dt} = f(T_{shs}, \dot{m}_d, T_d, T_m) \quad (L2.2)$$

Fungsi $f(T_{shs}, \dot{m}_d, T_d, T_m)$ dapat didekati dengan menggunakan pendekatan deret Taylor di sekitar titik *steady-state* (\bar{x})

$$\frac{d\bar{T}_{shs}}{dt} = f(\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m) = 0 \quad (L2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{shs}}{dt} = f(\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m) + & \\ \frac{\partial f}{\partial T_{shs}} \bigg|_{\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m} (T_{shs}(t) - \bar{T}_{shs}) + & \\ \frac{\partial f}{\partial \dot{m}_d} \bigg|_{\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m} (\dot{m}_d(t) - \bar{\dot{m}}_d) + & \\ \frac{\partial f}{\partial T_d} \bigg|_{\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m} (T_d(t) - \bar{T}_d) + & \\ \frac{\partial f}{\partial T_m} \bigg|_{\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m} (T_m(t) - \bar{T}_m) & \end{aligned} \quad (L2.4)$$

Dengan,

$$\left. \frac{\partial f}{\partial T_{shs}} \right|_{\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m} = -\frac{\bar{\dot{m}}_d}{V_{shs} \rho_s} - \frac{a_i \alpha_{ms}}{V_{shs} \rho_s C_p} ;$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \dot{m}_d} \right|_{\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m} = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{shs}}{V_{shs} \rho_s}$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial T_d} \right|_{\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m} = \frac{\bar{\dot{m}}_d}{V_{shs} \rho_s} ; \quad \left. \frac{\partial f}{\partial T_m} \right|_{\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m} = \frac{a_i \alpha_{ms}}{V_{shs} \rho_s C_p}$$

Pada $\bar{T}_{shs}, \bar{\dot{m}}_d, \bar{T}_d, \bar{T}_m$ merupakan nilai proses dalam keadaan *steady* dengan asumsi kondisi temperatur dan tekanan konstan, maka hasil linearisasi dapat ditunjukkan pada Persmaan (L2.6)

$$\begin{aligned} \frac{dT_{shs}}{dt} = & \left(-\frac{\bar{\dot{m}}_d}{V_{shs} \rho_s} - \frac{a_i \alpha_{ms}}{V_{shs} \rho_s C_p} \right) (T_{shs}(t) - \bar{T}_{shs}) + \\ & \left(\frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{shs}}{V_{shs} \rho_s} \right) (\dot{m}_d(t) - \bar{\dot{m}}_d) + \\ & \left(\frac{\bar{\dot{m}}_d}{V_{shs} \rho_s} \right) (T_d(t) - \bar{T}_d) + \\ & \left(\frac{a_i \alpha_{ms}}{V_{shs} \rho_s C_p} \right) (T_m(t) - \bar{T}_m) \end{aligned} \quad (L2.5)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dT_{shs}}{dt} = & \left(-\frac{\bar{\dot{m}}_d}{V_{shs} \rho_s} - \frac{a_i \alpha_{ms}}{V_{shs} \rho_s C_p} \right) T_{shs}(t) + \\
& \left(\frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{shs}}{V_{shs} \rho_s} \right) \dot{m}_d(t) + \\
& \left(\frac{\bar{\dot{m}}_d}{V_{shs} \rho_s} \right) T_d(t) + \left(\frac{a_i \alpha_{ms}}{V_{shs} \rho_s C_p} \right) T_m(t) - \\
& \left(-\frac{\bar{\dot{m}}_d}{V_{shs} \rho_s} - \frac{a_i \alpha_{ms}}{V_{shs} \rho_s C_p} \right) \bar{T}_{shs} + \\
& \left(\frac{\bar{T}_{shs} - \bar{T}_d}{V_{shs} \rho_s} \right) \bar{\dot{m}}_d - \left(\frac{\bar{\dot{m}}_d}{V_{shs} \rho_s} \right) \bar{T}_d - \\
& \left(\frac{a_i \alpha_{ms}}{V_{shs} \rho_s C_p} \right) \bar{T}_m
\end{aligned} \tag{L2.6}$$

Jika disederhanakan maka Persamaan (L2.6) menjadi

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{V_{shs} \rho_s C_p}{\dot{m}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \frac{dT_{shs}}{dt} + T_{shs}(t) = \\
& \left(\frac{(\bar{T}_d - \bar{T}_{shs}) C_p}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \dot{m}_d(t) + \\
& \left(\frac{\bar{\dot{m}}_d C_p}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) T_d(t) + \\
& \left(\frac{a_i \alpha_{ms}}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) T_m(t) + \\
& \left(\frac{(\bar{T}_{shs} - \bar{T}_d) C_p}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \bar{\dot{m}}_d - \\
& \left(\frac{\bar{\dot{m}}_d C_p}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \bar{T}_d - \\
& \left(\frac{a_i \alpha_{ms}}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \bar{T}_m + \bar{T}_{shs}
\end{aligned} \tag{L2.7}$$

dimana,

$$\begin{aligned}
T_1 &= \left(\frac{V_{shs} \rho_s C_p}{\dot{m}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right); \quad B_1 = \left(\frac{(\bar{T}_d - \bar{T}_{shs}) C_p}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right); \\
B_2 &= \left(\frac{\bar{\dot{m}}_d C_p}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \quad B_3 = \left(\frac{a_i \alpha_{ms}}{\bar{\dot{m}}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right);
\end{aligned}$$

$$B_4 = \left(\left(\frac{(\bar{T}_{shs} - \bar{T}_d) C_p}{\bar{m}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \bar{m}_d - \left(\frac{\bar{m}_d C_p}{\bar{m}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \bar{T}_d - \left(\frac{a_i \alpha_{ms}}{\bar{m}_d C_p + a_i \alpha_{ms}} \right) \bar{T}_m + \bar{T}_{shs} \right)$$

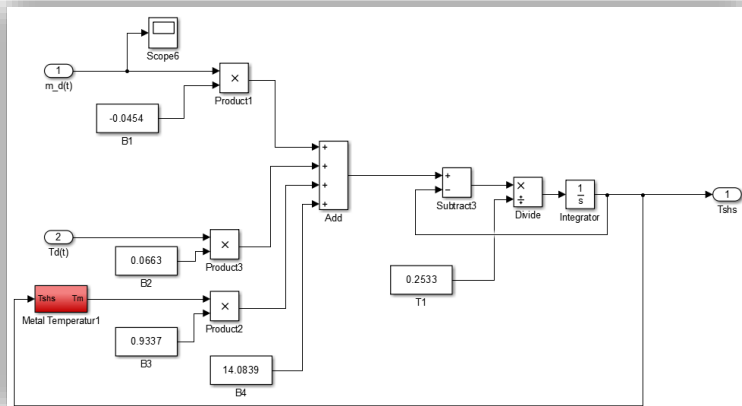
Dengan mensubstitusi nilai parameter pada **Tabel 3.2**, maka diperoleh

$$T_1 = 0.2533 ; B_1 = -0.0454 ; B_2 = 0.0663 ; B_3 = 0.9337 ; B_4 = 14.0839$$

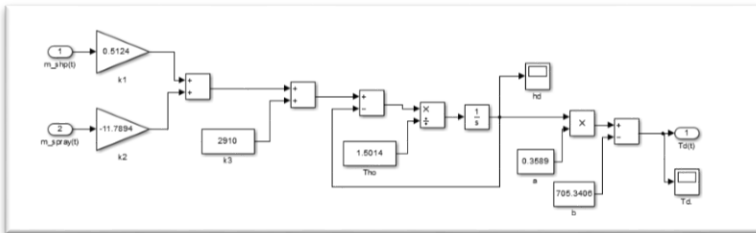
$$T_1 \frac{dT_{shs}}{dt} + T_{shs}(t) = B_1 \dot{m}_d(t) + B_2 T_d(t) + B_3 T_m(t) + B_4 \quad (L2.8)$$

$$0.2533 \frac{dT_{shs}}{dt} + T_{shs}(t) = -0.0454 \dot{m}_d(t) + -0.0663 T_d(t) + 0.9337 T_m(t) + 14.0839 \quad (L2.9)$$

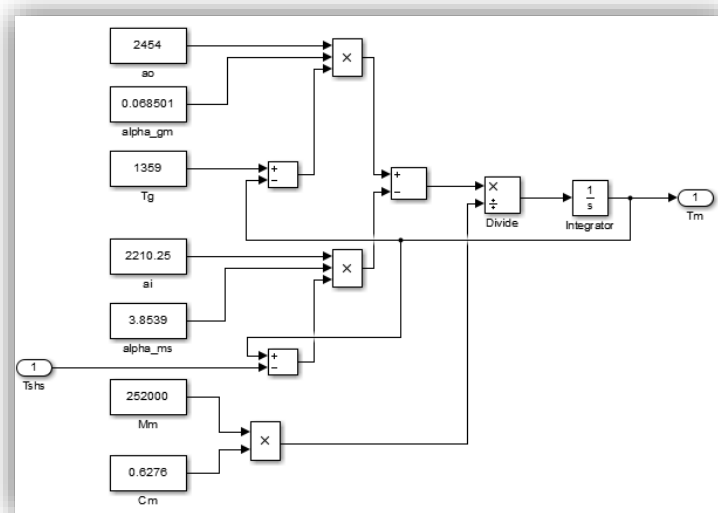
Lampiran 3. Program Simulink Model *Desuperheater*



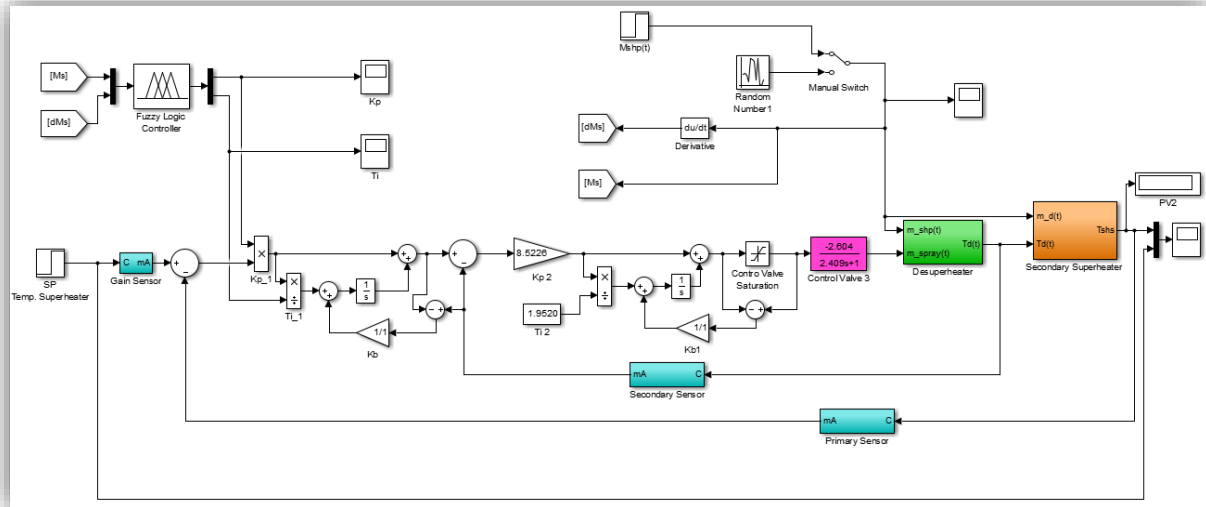
Lampiran 4. Program Simulink Model *Secondary Superheater*



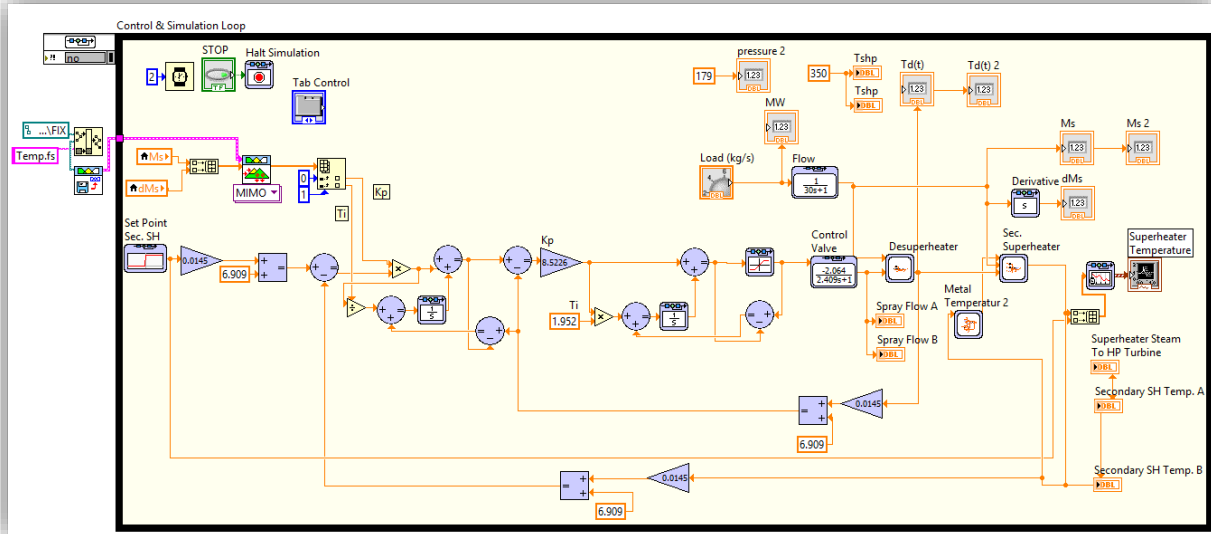
Lampiran 5. Program Simulink Model Temperatur Metal



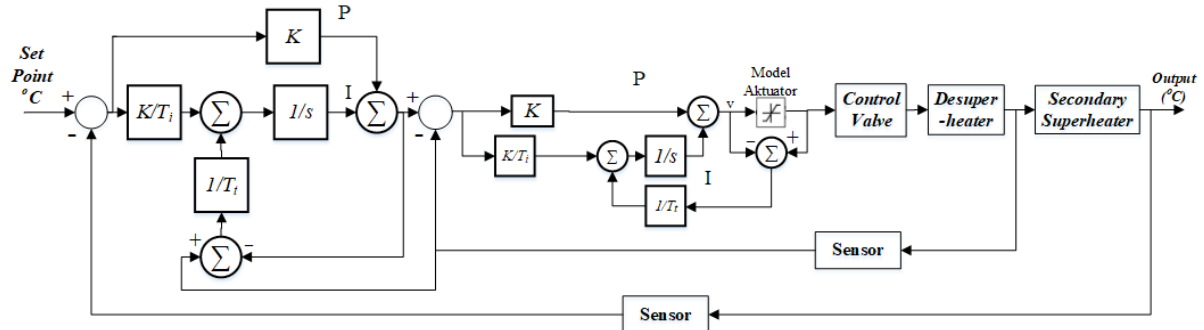
Lampiran 6. Program Simulink Sistem Pengaturan Konfigurasi *Cascade* dengan Kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner



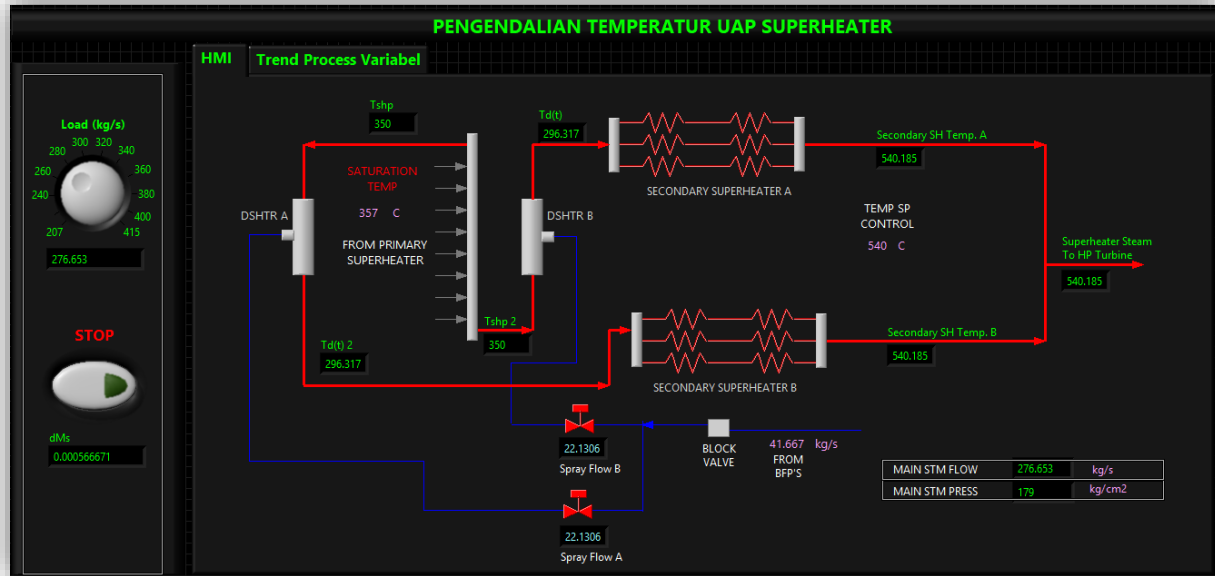
Lampiran 7. Program LabVIEW Sistem Pengaturan Konfigurasi *Cascade* dengan Kontroler PI-Fuzzy Auto-tuner

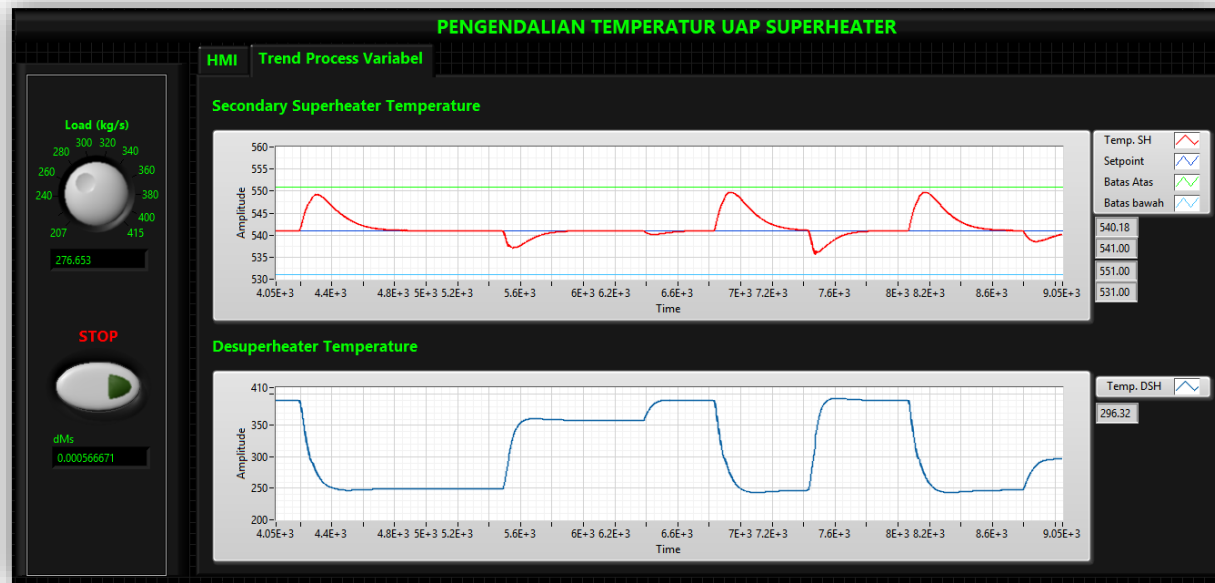


Lampiran 8. Konfigurasi Sistem Pengaturan Menggunakan Kontroler dengan Mode *Anti-Windup* dan *Tracking*



Lampiran 9. Human Machine Interface (HMI) Sistem Pengaturan Temperatur Uap Superheater





RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama Nindya Arthana Farianto, lahir di Sumedang 20 Oktober 1995. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Berasal dari Kota Pasuruan. Pernah menempuh pendidikan di SD Negeri Pagak pada tahun 2001 - 2006, SMP Negeri 8 Pasuruan tahun 2007 – 2009, SMA Negeri 1 Pasuruan tahun 2010 – 2012, kemudian melanjutkan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Jurusan Teknik Elektro tahun 2013. Motto penulis “Bersabar terhadap yang tidak kita sukai terdapat kebaikan yang luar biasa banyak”.

Email : nindyarthana@gmail.com